

Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle: Caso de Estudio Edificio Escuela de Enfermería

Ernesto Germán Porras Beltrán

Documento de tesis para optar al título de Máster en Arquitectura y Urbanismo

Tutor: Carlos Alberto Herrera Cáceres, Doctor (PhD) en Ingeniería Mecánica



Universidad del Valle
Facultad de Artes Integradas
Escuela de Arquitectura
Santiago de Cali
2025

En memoria de mi padre, cuya presencia sigue viva en mi mente y en mi corazón inspirándome a seguir siempre adelante.

Como él mismo decía: *“Para atrás, ni para coger impulso mijito”*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo.

A mi esposa Adriana, quien comprendió el esfuerzo de las numerosas madrugadas dedicadas a este proyecto. Gracias por tu aliento en los momentos difíciles, por celebrar conmigo los avances logrados y por sacrificar momentos juntos para que pudiera alcanzar esta meta. A mi tutor, el profesor Carlos Herrera, por animarme a emprender este desafío académico y por su invaluable guía durante las clases y el desarrollo de este trabajo. A mi madre, cuyo apoyo incondicional, oraciones y palabras de aliento han estado siempre presentes en cada camino que he decidido emprender. A mi hermana, quien me inspiró a tomar la decisión de cursar estos estudios de posgrado. A Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S., cuyos recursos fueron fundamentales para llevar a cabo el trabajo de campo y las simulaciones necesarias para este proyecto.

A todas las personas que de una u otra forma aportaron su tiempo, conocimientos y ánimo para que este logro fuera posible, mi más sincero agradecimiento.

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido	4
RESUMEN.....	13
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
A. Árbol del problema.....	16
B. Antecedentes	17
II. JUSTIFICACIÓN.....	20
III. OBJETIVOS.....	21
A. Objetivo general	21
B. Objetivos específicos.....	21
C. Árbol de objetivos	21
IV. MARCO TEÓRICO	23
A. Conceptos previos	23
1) Gases efecto invernadero (GEI)	23
2) Emisiones de CO _{2e} provenientes de las edificaciones.....	23
3) Eficiencia energética en edificaciones	29
4) Diseño pasivo de edificaciones	35
5) Edificaciones Cero Energía (ECE).....	70
6) Edificaciones Neto Cero (ENC).....	75
7) Calidad ambiental interior en edificaciones educativas	84
8) Simulaciones de rendimiento en edificaciones	92
B. Hojas de ruta.....	94
1) Definición.....	94
2) Planeación y Preparación	95
3) Visión	96

4)	Desarrollo de la hoja de ruta.....	96
5)	Implementación y Monitoreo	96
C.	Validación técnica de la edificación (Commissioning).....	97
1)	Definición.....	97
2)	Validación técnica de la edificación para el prediseño	98
3)	Validación técnica de la edificación para el diseño	99
4)	Validación técnica de la edificación para la construcción	100
5)	Validación técnica de la edificación para la operación	101
V.	METODOLOGÍA	103
A.	Enfoque	103
B.	Muestra.....	105
C.	Técnicas para recolección datos	105
D.	Procedimiento.....	106
E.	Análisis de datos.....	107
VI.	CASO DE ESTUDIO.....	108
A.	Localización y características funcionales	108
B.	Partes involucradas.....	110
C.	Recolección de datos	111
D.	Análisis de datos.....	111
E.	Evaluación comparativa “benchmarking”	112
F.	Propuestas de mejora y simulaciones.....	112
G.	Análisis y resultados.....	113
1)	Líneas base de consumo de energía y emisiones de CO _{2e}	113
2)	Validación de la Auditoría Energética Preliminar (PEA)	116
3)	Desagregación del uso de la energía	116

4)	Metas de reducción de líneas base a 2030 y 2040.....	117
5)	Estrategias para lograr metas de reducción de líneas base.....	118
VII.	PROPUESTA TÉCNICA.....	137
A.	Requerimientos mínimos de diseño pasivo y el proceso de Commissioning en el diseño de edificaciones.....	139
1)	Optimización de la envolvente y uso de recursos naturales.....	139
2)	Control solar.....	141
3)	Iluminación natural.....	143
4)	Ventilación natural.....	145
5)	Sistemas mecánicos complementarios.....	147
6)	Sistemas híbridos.....	151
7)	Proceso de VTE o Commissioning en el diseño de edificaciones.....	153
8)	Resumen de estrategias, relación con la VTE o Commissioning e impacto esperado.....	161
B.	Parámetros de construcción sostenible basados en Edificios Neto Cero y Commissioning.....	163
1)	Parámetros de construcción sostenible.....	164
2)	Rol de la VTE o Commissioning en la fase de construcción de una edificación.....	170
3)	Resumen de parámetros de construcción sostenible, relación con la VTE y su impacto esperado.....	176
C.	Lineamientos para una operación de edificaciones energéticamente eficientes basados en Edificios Cero Energía y Commissioning.....	177
1)	Fases de implementación de lineamientos de operación eficiente de edificaciones.....	179
2)	Impacto de la VTE o Commissioning en la operación de edificaciones sostenibles.....	192
3)	Resumen de lineamientos de operación eficiente de edificaciones, relación con la VTE y resultados esperados.....	194
H.	Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle.....	196
1)	Metodología para el desarrollo de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle.....	198

2) Metas	201
3) Hitos	210
4) Barreras y oportunidades.....	211
5) Acciones para ejecutar.....	214
6) Prioridades y plazos	216
7) Consideraciones para renovaciones y nuevas construcciones.....	218
VIII. CONCLUSIONES	220
A. Conclusiones generales	221
1) Impacto de las estrategias de diseño pasivo	221
2) Contribución de los lineamientos de construcción sostenible.....	221
3) Relevancia de los lineamientos de operación de edificaciones de alto desempeño	222
4) Rol de la Hoja de Ruta en la transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC).....	222
5) La VTE como pilar innovador en la transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) 223	
6) Aportes del caso de estudio en la validación de estrategias hacia Neto Cero	223
7) Impacto institucional de la propuesta técnica.....	224
B. Análisis crítico.....	225
C. Recomendaciones.....	226
1) Fortalecer los lineamientos de construcción sostenible	226
2) Desarrollar guías técnicas para la Hoja de Ruta.....	227
3) Ampliar el alcance de la Validación Técnica de la Edificación (VTE)	227
4) Realizar proyectos piloto basados en las proyecciones del caso de estudio	227
5) Integrar tecnologías emergentes como internet de las cosas (IoT) e inteligencia artificial (IA) 227	
6) Incorporar principios de economía circular.....	228
7) Fomentar la colaboración interdisciplinaria e institucional	228

8)	Abordar el problema del “greenwashing”	228
D.	Reflexión final.....	228
IX.	REFERENCIAS	230
X.	APÉNDICES	238
	VITA DEL AUTOR.....	247

LISTA DE TABLAS

TABLA I MATERIALES Y VALORES DE EMISIONES DE CO _{2e}	28
TABLA II DEFINICIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS ASHRAE	40
TABLA III METODOLOGÍA ASOCIADA A SATISFACER EL OBJETIVO GENERAL.....	104
TABLA IV ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA INSTALACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.....	135
TABLA V REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE DISEÑO PASIVO Y COMMISSIONING...	161
TABLA VI PARAMETROS DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE INTEGRADOS CON COMMISSIONING PARA LOGRAR ENC	176
TABLA VII LINEAMIENTOS DE OPERACIÓN EFICIENTE BASADOS EN EDIFICACIONES CERO ENERGÍA (ECE) Y COMMISSIONING.....	194

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Árbol del problema	16
Fig. 2 Árbol de objetivos	22
Fig. 3 Etapas del ciclo de vida de una edificación -Carbono Embebido y Operacional-	24
Fig. 4 Clasificación de gases efecto invernadero por alcances	26
Fig. 5 Distribución del consumo de energía eléctrica de un local promedio del sector comercial	32
Fig. 6 Distribución del consumo de energía eléctrica de un local promedio del sector público	33
Fig. 7 Enfoque de tres niveles para el diseño de edificaciones sostenibles de un edificio	36
Fig. 8 Temperatura de bulbo seco estación Univalle 2013 – 2023	42
Fig. 9 Humedad relativa estación Univalle 2013 – 2023	43
Fig. 10 Rosa de vientos día y noche estación Univalle 2013 – 2023	43
Fig. 11 Radiación solar estación Univalle 2013 – 2023	44
Fig. 12 Localización Escuela de Enfermería de la Universidad del Valle	46
Fig. 13 Entorno Escuela de Enfermería de la Universidad del Valle	47
Fig. 14 Vista de planta de modelo 3D de la Escuela de Enfermería de Univalle	47
Fig. 15 Análisis de incidencia y trayectoria solar equinoccio y solsticios de la Escuela de Enfermería de Univalle	48
Fig. 16 Estrategias y técnicas de diseño pasivo de edificaciones	51
Fig. 17 Formas básicas de edificaciones según el clima local	53
Fig. 18 Carta psicrométrica de Givoni para Cali	70
Fig. 19 Frontera de análisis de flujos de energía para el balance de una Edificación Cero Energía en Sitio	72
Fig. 20 Secuencia de diseño para Edificación Cero Energía	73
Fig. 21 Clasificación de edificaciones de acuerdo con sus emisiones de CO _{2e}	77
Fig. 22 Proceso de diseño arquitectónico neutro en carbono (CNDP)	78
Fig. 23 Esquema del proceso de elaboración de una hoja de ruta	95

Fig. 24 Estructura metodológica para desarrollar la hoja de ruta Edificaciones Cero Emisiones de la Universidad del Valle	103
Fig. 25 Fotos de la Escuela de Enfermería de Univalle	110
Fig. 26 Líneas base de consumo energético (kWh/m ² -año) y emisiones (tCO ₂ e-año) para Escuela de Enfermería Univalle (EEU) 2022	115
Fig. 27 Desagregación del uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) 2022	117
Fig. 28 Modelo 3D Edificio Escuela de Enfermería de Univalle.....	119
Fig. 29 Vistas del modelo 3D Edificio Escuela de Enfermería de Univalle	119
Fig. 30 Carga térmica Edificio Escuela de Enfermería de Univalle	120
Fig. 31 Simulación de iluminación natural Oficinas Piso 1 Escuela de Enfermería de Univalle (DF 0 - 5.6)	121
Fig. 32 Simulación de iluminación natural Aulas y Oficinas Piso 1 Escuela de Enfermería de Univalle (DF 0 - 6.1)	121
Fig. 33 Simulación de iluminación natural Aulas Piso 2 Escuela de Enfermería de Univalle (DF 0 - 9.4)	122
Fig. 34 Área representativa para mostrar evolución en iluminación natural en zona Aulas Piso 2 (DF 0 - 9.5).....	122
Fig. 35 Área representativa para mostrar evolución en iluminación natural en zona Oficinas Piso 1 (DF 0 - 5.7).....	123
Fig. 36 Fachada Zona Aulas Piso 2 con ventanas, aleros y cortasoles propuestos en EEU.....	124
Fig. 37 Fachada Zona Oficinas Piso 1 con ventanas y aleros propuestos en EEU	125
Fig. 38 Techo Zona Aulas Piso 2 con tragaluces propuestos en EEU	126
Fig. 39 Iluminación natural salón 201 Piso 2 con nuevas ventanas y tragaluces en techo (DF 0.25 – 9.33).....	127
Fig. 40 Iluminación natural Oficinas Recursos Humanos Piso 1 con nuevas ventanas (DF 0.53 – 6.25).....	127
Fig. 41 Desagregación del uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) con diseño pasivo y MEE	130

Fig. 42 Líneas base de consumo energético (kWh/m2-año) y emisiones (tCO2e-año) para Escuela de Enfermería Univalle (EEU) proyectadas con diseño pasivo y Medidas de Eficiencia Energética (MEE).....131

Fig. 43 Ubicación de paneles solares fotovoltaicos en cubierta Escuela Enfermería de Univalle (EEU)134

Fig. 44 Desagregación del uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) con diseño pasivo, MEE y Energías Renovables (ER).....134

Fig. 45 Líneas base de consumo energético (kWh/m2-año) y emisiones (tCO2e-año) para Escuela de Enfermería Univalle (EEU) proyectadas con diseño pasivo más MEE y Energías Renovables (ER)135

Fig. 46 Integración de actividades del proceso de Commissioning al diseño típico de una edificación153

Fig. 47 Integración de actividades del proceso de Commissioning al proceso de construcción de una edificación164

Fig. 48 Integración lineamientos de operación eficiente de una edificación a través del Commissioning.....179

RESUMEN

Este trabajo se centró en elaborar la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle en marco del proyecto Universidades Cero Emisiones de CEELA¹, utilizando el edificio de la Escuela de Enfermería como caso de estudio. Se realizó un análisis de fuentes científicas y normativas sobre Diseño Pasivo, Edificaciones Cero Energía y Edificaciones Neto Cero. Este análisis, respaldado por un enfoque cuantitativo, permitió evaluar el consumo de energía y las emisiones de CO_{2e} en el edificio seleccionado para el caso de estudio.

En colaboración con la Oficina de Infraestructura de la universidad se optó por la Escuela de Enfermería debido a su representatividad y cumplimiento de requisitos para llevar a cabo una evaluación energética de nivel I bajo la metodología de Building Energy Quotient (bEQ) de ASHRAE². Las técnicas de recolección de datos abarcaron análisis de planos, visitas y consultas directas a usuarios, implementando procedimientos prácticos para verificar el consumo eléctrico de la edificación y la recopilación de datos técnicos y arquitectónicos. El análisis de datos y la simulación bioclimática definieron las medidas de eficiencia energética y las estrategias de diseño pasivo para disminuir el consumo de energía y emisiones de CO_{2e} en la Escuela de Enfermería. Los resultados permitieron establecer, con base en el proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning, requerimientos mínimos de diseño, parámetros y lineamientos para reducir emisiones durante la construcción y operación, y un plan estratégico con objetivos claros, responsabilidades y un cronograma de implementación.

Este trabajo demostró que la integración de estrategias sostenibles y herramientas como la VTE puede posicionar a Univalle como referente en sostenibilidad educativa. Las acciones propuestas buscan reducir la huella de carbono institucional y promover un campus más resiliente y eficiente. En conjunto, implicó el manejo de conceptos avanzados de ingeniería y arquitectura bioclimática que van más allá de lo habitual en la práctica profesional de pregrado, generando una base sólida e innovadora para la toma de decisiones y acciones concretas hacia la sostenibilidad en la Universidad del Valle.

***Palabras clave* – Bioclimática, Commissioning, Diseño Pasivo, Edificaciones Neto Cero, Eficiencia Energética, Hoja de Ruta, Sostenibilidad y Universidad del Valle.**

¹ Proyecto de la Confederación Suiza COSUDE: Fortaleciendo Capacidades para la Eficiencia Energética en Edificios en América Latina.

² American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las edificaciones a nivel mundial contribuyen significativamente al cambio climático siendo responsables de aproximadamente el 37% de las emisiones de CO₂ y del 34% del consumo final de energía, incluyendo la energía necesaria para la fabricación de materiales. Según datos de 2022, el 8% de las emisiones mundiales de CO₂ son relacionadas con el uso de energía en las edificaciones, un 18% debido a la generación de electricidad y calor usados principalmente para cubrir las necesidades de calefacción y refrigeración que satisfacen los requerimientos de confort térmico de los ocupantes, y un 11% adicional relacionado con la fabricación de cemento, acero y aluminio utilizados para la construcción de estas [1].

En el contexto de Estados Unidos, las edificaciones consumen aproximadamente el 39% de la energía primaria, incluido el 70% de la electricidad y son responsables de aproximadamente el 38% de emisiones de CO₂ [2].

Colombia no está exenta de este desafío. En 2019, el 58,6% de la energía eléctrica disponible para uso final fue consumida por los sectores residencial urbano y terciario (comercial y público) [3], mientras que en el 2020 las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI)³ producidas por las edificaciones representaron alrededor del 16,4% de las emisiones nacionales, excluyendo las emisiones del sector Agricultura, Silvicultura y Uso del Suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) [4]. Adicionalmente, bajo el escenario de línea base, las emisiones de GEI de las edificaciones en Colombia aumentan a una tasa anual equivalente de 1,8%, lo que se traduce en un incremento desde 18.9 MtCO₂ en el año 2020 hasta 32.6 MtCO₂ en 2050; mientras que en Cali crecen desde las 0.9 MtCO₂ en 2020 hasta 1.7 MtCO₂ en 2050 [5].

Estos datos están estrechamente relacionados con las decisiones de diseño arquitectónico tomadas en etapas tempranas, las cuales tienen un impacto significativo en la generación de bienestar para los ocupantes, la cantidad de energía usada y embebida en los materiales durante la construcción, y la intensidad de uso de energía asociada a la operación de la edificación que está principalmente relacionada con satisfacer los requerimientos de confort térmico [6].

³ Aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja.

El sector de la construcción tiene una huella de carbono⁴ muy grande cuando se contabilizan las emisiones directas e indirectas de CO₂ debido a la construcción y operación de edificaciones y ante la necesidad urgente de reducir estas emisiones Colombia aprobó el Acuerdo de París [7], por el cual los países firmantes se comprometen a tomar acciones para mantener el aumento de la temperatura media mundial 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, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático [8].

Para lograr los ambiciosos objetivos del Acuerdo de París, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático estableció que para el 2030 el ambiente construido debe reducir a la mitad sus emisiones por lo que, para el 2050 a más tardar, todas las edificaciones nuevas y existentes deben ser Neto Cero, lo que significa reducir las emisiones de CO₂ lo más cerca posible de cero durante todo el ciclo de vida, incluidas las emisiones de carbono operativo y embebido⁵ [9].

Con base en lo anterior, es pertinente que las organizaciones empresariales e instituciones públicas y privadas lideren la transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) para el 2050 y que tengan planes de acción para mitigar el efecto de la construcción y operación de las edificaciones. Sin embargo, la Universidad del Valle (Univalle), institución pública de educación superior que cuenta en su sede principal con más de 80 edificios como aulas, laboratorios, bibliotecas, centros de investigación, áreas administrativas y deportivas, entre otros, no incluye en su plan de desarrollo 2015-2025 [10] acciones específicas destinadas al incremento de la eficiencia energética mediante la reducción del consumo de energía de sus edificaciones, ni tampoco a la reducción de emisiones de CO₂ en sus diferentes sedes. En el plan de desarrollo vigente, tan solo se encuentra en su programa 4.4.1 de optimización de infraestructura física, lo siguiente: *“ejecutar la construcción de nuevos edificios, obras de espacio público y reforzamiento estructural e intervención arquitectónica de las sedes de Cali y sedes Regionales. Además, mantener y conservar en buen estado la infraestructura física que la Universidad tiene para cumplir con sus funciones”*.

⁴ Cantidad de CO₂ liberada a la atmósfera como resultado de las actividades de un individuo, organización o comunidad en particular.

⁵ Carbono embebido es el generado por los procesos de extracción, transporte y fabricación de materiales, la maquinaria y los equipos utilizados en la construcción, el mantenimiento y la reparación de edificaciones.

A. Árbol del problema

Como se muestra en la Fig. 1 (léase de abajo hacia arriba), la falta de estrategias sostenibles en el diseño, construcción, operación y uso de energía en las edificaciones, así como la falta de integración de estas estrategias en un proceso de validación técnica como el Commissioning a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones, resulta en un insuficiente proceso de diseño de edificaciones, una alta energía embebida en la construcción, y en altos consumos de energía durante la operación. Estas son las causas fundamentales de la alta generación de CO₂ en las edificaciones de Univalle. Estas prácticas inadecuadas tienen repercusiones negativas en la mitigación del cambio climático, aumento de la huella de carbono de la universidad, y en la generación de altos costos de operación y mantenimiento. Lo anterior trae consigo impactos sobre el medio ambiente y la salud humana y la salud humana además de grandes desafíos financieros, operativos, y en el uso de los recursos energéticos en la universidad, lo que en última instancia representa un deterioro en la calidad de vida y las expectativas futuras de las personas.

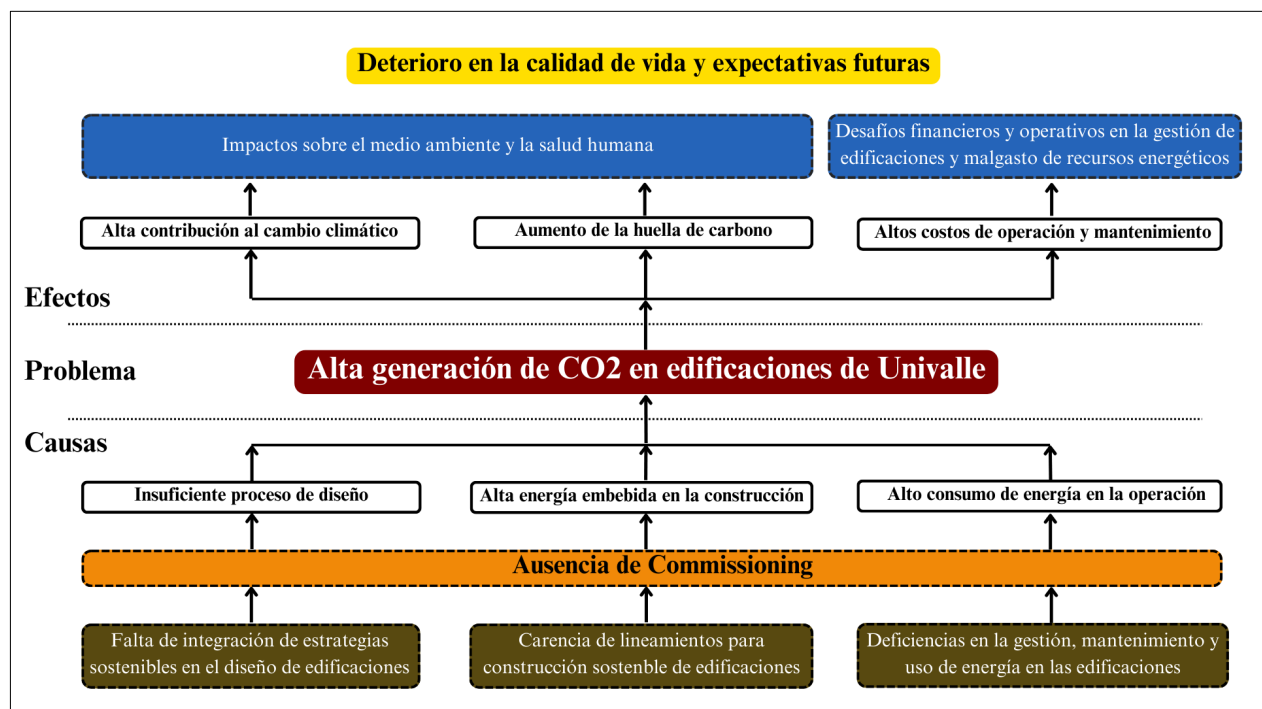


Fig. 1 Árbol del problema

B. Antecedentes

Las Edificaciones Neto Cero (ENC) han surgido como una estrategia prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles que causan emisiones de CO₂ en el sector de la construcción. Una revisión de los avances globales en el campo de la investigación sobre ENC realizada por Eric Ohene en el 2022 [11], y que tuvo como objetivo explorar el estado del arte en este campo, mostró que los principales temas de investigación incluyen eficiencia energética, Edificaciones Cero Energía (ECE), evaluación del ciclo de vida, energía embebida y simulación energética.

Este trabajo de investigación es relevante para este proyecto porque logra identificar las principales áreas de conocimiento en las que se debe profundizar, las tecnologías emergentes aplicables para lograr ENC, y los retos en este campo. También concluye que las Medidas de Eficiencia Energética (MEE) son claves para lograr este objetivo y que la primera consideración para tener en cuenta es reducir el uso de energía en la operación de la edificación a través de MEE y estrategias de diseño pasivo y cubrir las necesidades de energía restantes a través del uso de energías renovables.

Otro aspecto fundamental en el camino hacia ENC es el diseño arquitectónico. En el 2017, Pablo La Roche plasmó en su libro *“Carbon-Neutral Architectural Design”* [12], los conceptos básicos necesarios para el diseño de edificaciones de bajas emisiones y neutros en carbono, y propone un método para reducir las emisiones de CO₂ de las edificaciones con énfasis en el diseño de una envolvente que funcione de manera óptima con los sistemas de climatización para proveer, siempre que sea posible, calefacción, enfriamiento y luz diurna sin generar emisiones de CO₂.

Para lograr lo anterior, el autor propone un proceso sistemático de diseño llamado “Proceso de Diseño Arquitectónico Neutro en Carbono” (CNDP, por sus siglas en inglés). El primer paso en este proceso es generar una línea base de emisión de CO₂, normalmente en kg de CO_{2e}/m²-año, que es luego usada luego como referencia. Posteriormente, el diseñador continúa generando y evaluando ideas que compara con los objetivos y la línea base, y las ajusta de acuerdo con la necesidad. El CNDP será utilizado en este proyecto para organizar las etapas, acciones y estrategias en un proceso de diseño que ayuden a reducir las emisiones de CO₂ generadas por las edificaciones.

Por otra parte, las Edificaciones Cero Energía (ECE) son una solución realista, alcanzable y efectiva para reducir el uso de energía y mitigar las emisiones de CO₂ en los edificios [13]. En

una revisión bibliográfica sobre investigaciones en el campo de ECE realizada por Hossein Omrany en el 2022 [14], se concluyó que durante las últimas tres décadas los investigadores de ECE se han enfocado en la mejora del desempeño energético de las edificaciones, la producción de energía, y el empleo de herramientas asistidas por computador como un enfoque metodológico para analizar el desempeño energético de estas.

También se evidencia que las medidas de eficiencia energética dentro del contexto de las ECE, se pueden clasificar en dos grupos, (1) medidas que contribuyen a minimizar la demanda de energía de las edificaciones donde se tienen en cuenta estrategias de diseño pasivo como el diseño eficiente de la envolvente, la orientación, el diseño interior, la protección solar y la relación ventana-pared; y (2) las medidas que ayudan a las edificaciones a satisfacer sus requerimientos de operación mediante el uso de menos energía como puede pasar cuando se usan sistemas mecánicos y eléctricos de alta eficiencia energética. Adicionalmente, son clave dentro del análisis de ECE, la producción de energía renovable y el uso del Modelado de Información de Construcción (BIM, por sus siglas en inglés).

Este trabajo será de utilidad para esta tesis ya que permitirá usar el enfoque más común que se ha usado para estudiar ECE, el cual implica tener presentes Medidas de Eficiencia Energética (MEE), uso de energías renovables y uso de herramientas computacionales para su análisis.

Enfocar esfuerzos hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) en Univalle implica identificar los pasos necesarios para acelerar la implementación de cambios tecnológicos radicales que permitirán a los directivos de la universidad tomar las decisiones correctas en su transición hacia un futuro con bajas emisiones de CO₂ en sus sedes. Es así como, tomando como base la amplia experiencia de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) en desarrollar hojas de ruta de tecnología energética global se usará en esta tesis el documento “Hojas de Ruta de Tecnología Energética: Una Guía para el Desarrollo y la Implementación” [15], que servirá para generar el contexto, la información y las herramientas necesarias para diseñar, gestionar e implementar un proceso efectivo de hoja de ruta que le permita a Univalle tener ENC.

De esta guía se hará uso del proceso detallado que utiliza la IEA para identificar los actores clave, desarrollar la línea de base tecnológica y desarrollar los indicadores para ayudar a monitorear el progreso con respecto a los hitos establecidos en la hoja de ruta. En el ámbito nacional, Colombia cuenta con la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono [4] que aborda el ciclo de vida completo y establece metas graduales de reducción de carbono operacional y embebido

entre 2030 y 2040, con el fin de lograr edificaciones Neto Cero en 2050. Esta hoja de ruta nacional servirá como referencia principal para alinear las metas y acciones específicas definidas en la hoja de ruta Edificaciones Neto Cero Univalle.

Como complemento a lo anterior, una herramienta fundamental para la implementación de la hoja de ruta es el proceso de Commissioning o Validación Técnica de la Edificación (VTE) como lo denominaremos en esta tesis, la cual tiene como objetivo revisar, probar y validar que lo diseñado y construido está operando en un alto nivel de eficiencia energética y de Calidad Ambiental Interior (IEQ, por sus siglas en inglés)⁶ para satisfacer las necesidades y requerimientos del cliente. Datos tomados en 2018 de edificaciones que realizaron un proceso de VTE mostraron que tuvieron ahorros de energía del 6% en promedio [16]. Otro estudio [17] mostró que la VTE permite reducir los costos energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero con tiempos promedio de retorno de inversión de 4.2 años o un 23% expresado como flujo de caja. Estos son resultados contundentes y muy favorables, que muestran los beneficios reales de la aplicación de la VTE en el ciclo de vida de las edificaciones.

Adicionalmente, algunos propietarios de edificaciones que contaron con un proceso de VTE durante las fases de diseño y construcción reportaron mejoras no relacionadas con ahorros de energía como son: 95% sobre el confort térmico, 72% en la Calidad del Aire Interior (IAQ, por sus siglas en inglés), 87% en mejores prácticas de operación y mantenimiento, 87% en la capacitación al personal de operación y mantenimiento y 69% de aumento en la vida útil de los equipos [18].

Con base en los beneficios mostrados por el proceso de Commissioning o Validación Técnica de la Edificación (VTE), el estándar ASHRAE 202-2018 y la guía ASHRAE 0-2019 serán tomados como referencia para formular las etapas de diseño de edificaciones, y definir los parámetros de construcción sostenible y los lineamientos para una operación energéticamente eficiente de las edificaciones en Univalle que contribuirán a disminuir las emisiones de CO₂.

⁶ La calidad ambiental interior (IEQ) contempla: Confort térmico, calidad de aire interior, confort visual y lumínico, confort acústico.

II. JUSTIFICACIÓN

Reducir las emisiones globales de CO₂ a Neto Cero para 2050 es consistente con los esfuerzos para limitar el aumento a largo plazo de la temperatura media mundial a 1.5°C y esto exige una transformación completa de cómo producimos, transportamos y consumimos energía [19]. En este sentido, el sector de la construcción de las edificaciones y sus operadores tienen la responsabilidad de establecer un plan de acción que permita incrementar la eficiencia energética de las edificaciones para disminuir el consumo de energía y así minimizar las emisiones de CO₂ producidas en estas.

Un plan de acción se puede plasmar en una hoja de ruta, la cual describe los pasos que una empresa o entidad debe tomar para lograr los resultados y objetivos establecidos y definir las tareas y prioridades a corto, medio y largo plazo. Una hoja de ruta efectiva también incluye métricas e hitos que permiten un seguimiento continuo del progreso hacia los objetivos finales establecidos [15].

La Universidad del Valle (Univalle) no cuenta con una hoja de ruta o plan de acción estratégico para reducir el consumo de energía en las edificaciones ni reducir las emisiones de CO₂ producidas por su operación. Adicionalmente, en el ámbito local, la Alcaldía de Santiago de Cali ha estado llevando a cabo proyectos como el Manual de Construcción Sostenible y el proyecto Acelerador de Edificaciones Neto Cero Carbono 2021, los cuales permiten alinearse con los objetivos de la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono 2022. Estas iniciativas locales resaltan la importancia de la sostenibilidad en la construcción y operación de edificaciones, lo cual es fundamental para el futuro ambiental de la región.

Por lo anterior, es imperativo que Univalle cuente con un plan de acción que le permita alinearse con los intereses y políticas locales y nacionales en cuanto a reducción de emisiones de CO₂ producidas por las edificaciones. Este plan no solo contribuirá significativamente a la sostenibilidad ambiental, sino que también establecerá un precedente importante para otras instituciones y fomentará un enfoque más consciente y responsable hacia el medio ambiente en el ámbito educativo.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Desarrollar la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero para Univalle a partir del caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería.

B. Objetivos específicos

1. Formular los requerimientos mínimos que incorporen diseño pasivo y el proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE) en el diseño de edificaciones en Univalle.
2. Establecer parámetros de construcción sostenible de edificaciones en Univalle basados en Edificios Neto Cero y el proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE).
3. Definir lineamientos para una operación de edificaciones energéticamente eficientes en Univalle basados en Edificios Cero Energía y el proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE).

C. Árbol de objetivos

Como se ilustra en la Fig. 2 (léase de abajo hacia arriba), para que una edificación sea energéticamente eficiente y alcance el objetivo de Neto Cero, es esencial integrar estrategias de diseño sostenible, métodos de construcción adecuados, y buenas prácticas de gestión de edificaciones. Esto puede lograrse siguiendo las pautas del proceso de Commissioning o Validación Técnica de la Edificación (VTE). Este proceso implica formular y definir todos los requerimientos mínimos para tener un diseño de edificaciones sostenibles, así como establecer los parámetros de ejecución de la construcción y finalmente definir los lineamientos para que las edificaciones funcionen como se proyectaron para alcanzar el anhelado Neto Cero. De esta manera, se alcanza el objetivo general que es la elaboración de la hoja de ruta Edificaciones Neto Cero para Univalle. Una vez se disponga de la hoja de ruta se podrá, en consecuencia, mitigar los efectos adversos del cambio climático, disminuir la huella de carbono, y optimizar la gestión financiera, operativa y energética en las edificaciones de la universidad. Además, contribuirá

significativamente a mejorar la calidad de vida y las expectativas de quienes interactúan con estos espacios, proporcionando también una guía de buenas prácticas para desarrollar políticas ambientales sostenibles en Univalle.

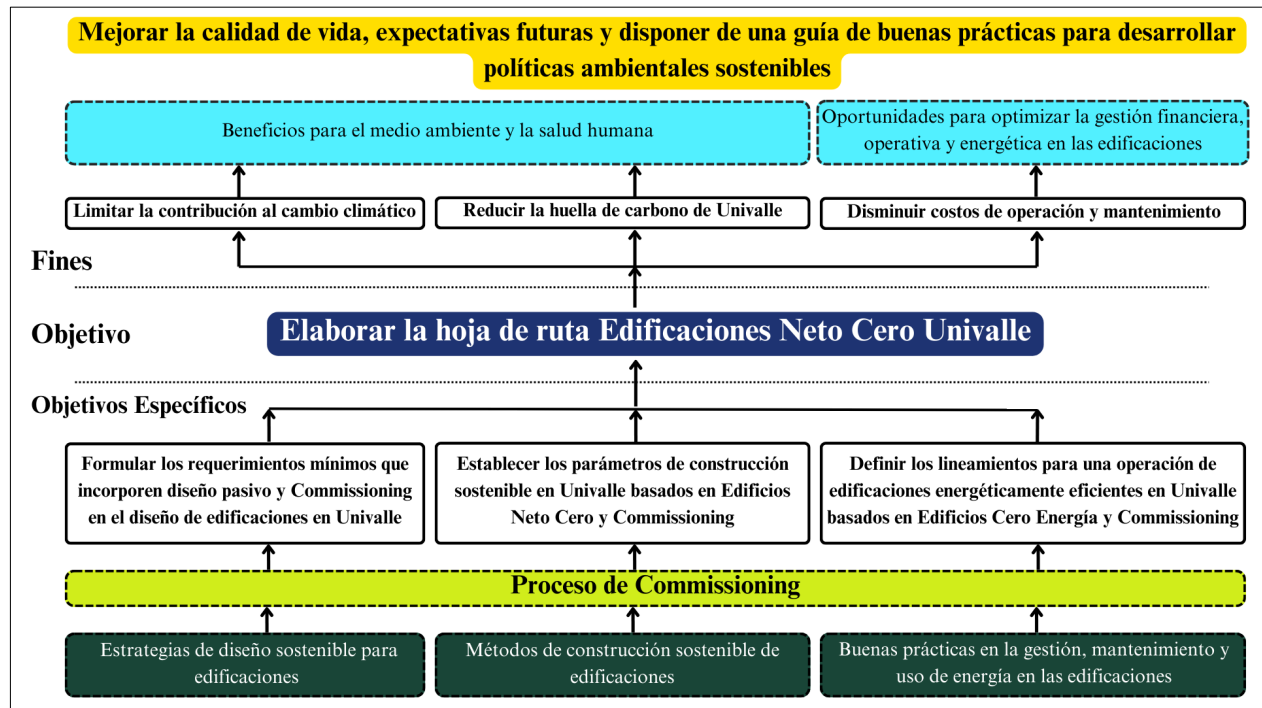


Fig. 2 Árbol de objetivos

IV. MARCO TEÓRICO

A. Conceptos previos

1) Gases efecto invernadero (GEI)

Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como generados por las actividades humanas, que absorben y emiten radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera, y por las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre [20].

El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero generado por las actividades humanas y es la referencia contra la que se miden los demás gases de efecto invernadero, por lo que tiene un potencial de calentamiento global de 1. En este contexto, surge el concepto de “CO₂ equivalente” (CO_{2e}), una métrica esencial en la comprensión y manejo de las emisiones, ya que proporciona una medida uniforme y comparable de la magnitud del impacto climático de diferentes gases de efecto invernadero. El CO_{2e} se expresa en términos de toneladas de CO_{2e} (tCO_{2e}) y se adopta como la métrica central en este trabajo para referenciar y cuantificar las emisiones provenientes de las edificaciones.

2) Emisiones de CO_{2e} provenientes de las edificaciones

a) Definición

Las emisiones de CO_{2e} provenientes de las edificaciones se refieren a aquellas generadas a lo largo de su ciclo de vida. Estas emisiones se derivan principalmente de su consumo de energía, que proviene tanto del uso directo de combustibles fósiles como de la electricidad generada a partir de estos combustibles. Se estima que las emisiones combinadas de CO_{2e}, tanto de la operación de las edificaciones como de la producción y transporte de los materiales utilizados en su construcción, representan aproximadamente el 37% de las emisiones globales [1].

La Fig. 3 muestra las etapas del ciclo de vida de una edificación y las subdefiniciones para distinguir un enfoque específico, según lo definido por la norma EN 15978⁷. Según el “*New Buildings Institute*” [21], más de un 25% de las emisiones de CO_{2e} provenientes de las edificaciones, son emisiones de carbono embebido, las cuales están asociadas principalmente con la extracción, producción y transporte de materiales, las actividades de construcción, y la demolición, reciclaje y disposición final de desechos (etapas A1-A5, B1-B5, C1-C4 y D). La otra parte, el 75% aproximadamente, corresponde al carbono operacional, que abarca las emisiones asociadas con la operación y el uso de la edificación, incluyendo la energía operativa y el consumo de agua (etapas B6 y B7).

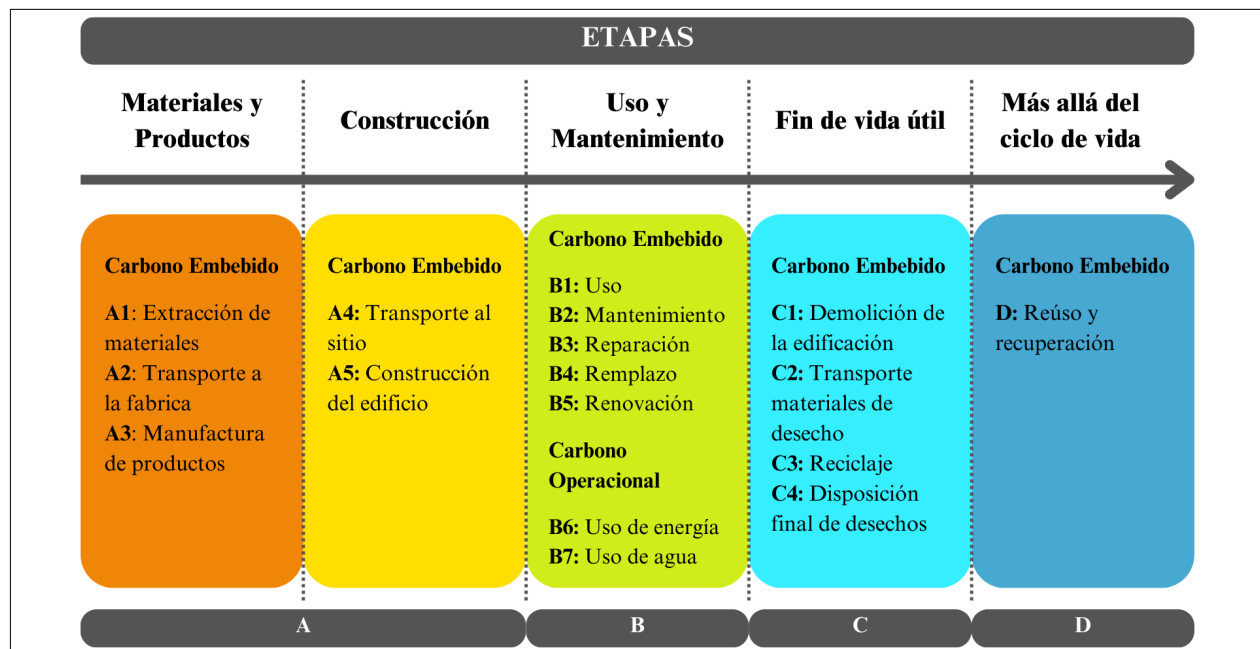


Fig. 3 Etapas del ciclo de vida de una edificación -Carbono Embebido y Operacional-

Lo anterior puede expresarse a través de la ecuación 1 como:

$$E_T = E_{CE} + E_{CO} \quad (1)$$

Donde:

⁷ European Standards, BS EN 15978:201 Sustainability of Construction Works. Assessment of Environmental Performance of Buildings. Calculation Method.

E_T son las emisiones totales en tCO_{2e}

E_{CE} son las emisiones de carbono embebido en tCO_{2e}

E_{CO} son las emisiones de carbono operacional en tCO_{2e}

b) Clasificación de gases efecto invernadero por alcances

La UNEP⁸ propone una clasificación de emisión de gases de efecto invernadero basada en tres (3) alcances que evalúan las emisiones de CO_{2e} exclusivamente durante la fase de uso y mantenimiento de la edificación (etapas B1-B7, Fig. 3). Esta clasificación, ampliamente adoptada por la mayoría de los protocolos relacionados con gases de efecto invernadero, será aplicada en este trabajo para contabilizar las emisiones de CO_{2e} de los alcances 1 y 2. A continuación se presenta dicha clasificación la cual es representada gráficamente también en la Fig. 4:

- **Alcance 1: Emisiones directas de CO_{2e}.** Estas emisiones provienen de fuentes ubicadas dentro de los límites de la edificación, tales como las generadas por la combustión de combustibles utilizados en calderas, hornos o turbinas, y las fugas derivadas de equipos de refrigeración.
- **Alcance 2: Emisiones indirectas de CO_{2e}.** Estas emisiones son el resultado de las actividades que ocurren por fuera de los límites de la edificación como, por ejemplo, las emisiones producidas a partir de la generación de energía eléctrica o térmica que se utiliza en la edificación.
- **Alcance 3: Otras emisiones indirectas.** Este alcance aborda las emisiones indirectas no cubiertas en las actividades del alcance 2 que son relevantes para la operación de la edificación. Aquí se incluyen actividades relacionadas con la extracción de materias primas, transporte durante todas las etapas del ciclo de vida de la edificación, así como las prácticas relacionadas con el uso posterior, como la reutilización y el reciclaje de los componentes de la edificación.

⁸ United Nations Environment Programme.

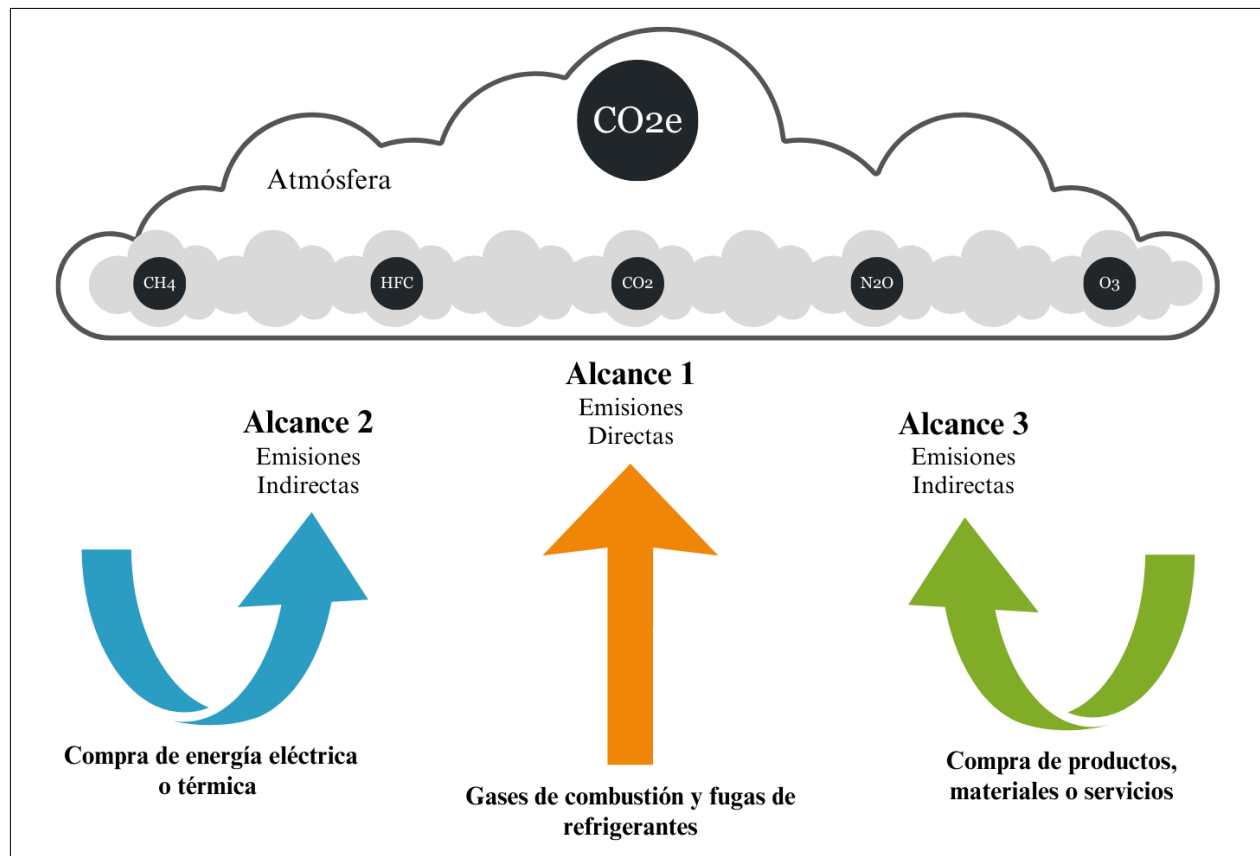


Fig. 4 Clasificación de gases efecto invernadero por alcances

c) Cálculo de emisiones de CO_{2e} en edificaciones

El cálculo de emisiones de CO_{2e} en edificaciones es fundamental para evaluar su impacto ambiental y establecer estrategias efectivas de mitigación. En este literal se prioriza el cálculo de las emisiones del alcance 3 mientras que las emisiones de los alcances 1 y 2 serán abordadas en el capítulo 6. Como ya se mencionó, el alcance 3 aborda las emisiones de CO_{2e} generadas durante la extracción, transporte, fabricación, instalación y disposición de los materiales utilizados en la construcción de una edificación. Estas emisiones representan una parte significativa del impacto ambiental total de una edificación especialmente en su fase inicial y son críticas para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética.

El análisis de emisiones del alcance 3 sigue una metodología basada en el Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), un enfoque estandarizado que evalúa el impacto ambiental de los materiales en todas las etapas de su ciclo de vida desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este método está regulado por normativas internacionales como la ISO 14040 y la ISO 14044 que establecen los principios y requisitos técnicos para realizar evaluaciones

consistentes. En el ámbito de la construcción, normativas como la EN 15804 y la ISO 21930 proporcionan reglas específicas para materiales y productos de construcción permitiendo integrar el LCA en proyectos arquitectónicos y garantizar un análisis estricto y comparable. El LCA considera:

- **Extracción de materias primas:** Considera la minería de piedra caliza para la producción de cemento.
- **Fabricación y procesamiento:** Tiene en cuenta la producción de cemento portland o el acero estructural.
- **Transporte al sitio de construcción:** Contempla las distancias recorridas y los medios de transporte utilizados que influyen directamente en este componente.
- **Construcción e instalación:** Incluye las emisiones generadas por el uso de maquinaria y procesos necesarios para ensamblar los materiales en la edificación.

Según la tesis del arquitecto Duver Alarcón [22], la metodología de cálculo y la recopilación de datos para emisiones de CO_{2e} correspondientes al alcance 3 incluye:

1. **Definición de objetivos y alcance:** Establece los límites del sistema y los materiales a evaluar, considerando las particularidades del sector de la construcción en Colombia.
2. **Inventario del Ciclo de Vida (LCI, por sus siglas en inglés):** Recopila datos sobre flujos de entrada (materias primas, energía) y salida (emisiones, residuos) asociados a cada etapa.
3. **Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (LCIA, por sus siglas en inglés):** Analiza los datos para cuantificar las emisiones de CO_{2e} y otros impactos relevantes.
4. **Interpretación:** Identifica oportunidades de mejora y estrategias de mitigación basadas en los resultados obtenidos.

Este enfoque, adaptado al contexto colombiano, utiliza factores de emisión específicos y datos locales para proporcionar una evaluación más precisa y realista. Con base en lo anterior, se presenta la TABLA I donde se muestran los valores de emisiones relacionadas con el alcance 3 de algunos de los materiales más comunes en la construcción junto con sus respectivas fuentes y comentarios relevantes.

TABLA I MATERIALES Y VALORES DE EMISIONES DE CO_{2e}

Material	Emisiones (kgCO _{2e} /kg de material)	Fuente	Comentarios
Cemento Portland	0.5	Arq. Duver Alarcón [22]	Alta generación de emisiones debido a la calcinación del Clinker y combustibles fósiles
Acero Estructural	1.06	Arq. Duver Alarcón [22]	Emisiones significativas por extracción, procesamiento y energía requerida
Ladrillo Cocido	0.28	Arq. Duver Alarcón [22] y Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero [4]	Valor moderado de emisiones, depende del tipo de energía utilizada para la cocción
Vidrio	1.2 – 1.5	The Inventory of Carbon and Energy (ICE) [23]	Requiere mucha energía para la fundición y el enfriamiento durante su fabricación
Asbesto-Cemento	0.45	Arq. Duver Alarcón [22]	Impacto moderado por mezcla de materiales con procesos industrializados
Madera	(-0.4) – (-1.0)	The Inventory of Carbon and Energy (ICE) [23]	Emisiones negativas por la capacidad de almacenamiento de carbono del material

Para mitigar las emisiones embebidas en edificaciones, es fundamental adoptar estrategias enfocadas en la sostenibilidad de los materiales y procesos constructivos. Esto incluye la selección de materiales con menor generación de emisiones de CO_{2e}, como concreto bajo en carbono, acero reciclado o madera certificada, que contribuyen a una reducción significativa del impacto ambiental. La optimización del diseño estructural mediante técnicas eficientes y el uso de elementos prefabricados permite minimizar el uso de materiales con alta generación de emisiones. Asimismo, el fomento de la economía circular priorizando materiales reciclados y reutilizados, ayuda a reducir la demanda de materias primas vírgenes. Por último, el transporte eficiente y la elección de proveedores locales juegan un papel clave al minimizar las emisiones asociadas a la logística y distribución de materiales. Estas estrategias junto con el uso de herramientas de evaluación como “*One Click LCA*” [24] o bases de datos locales, proporcionan un enfoque completo para reducir las emisiones del alcance 3 y avanzar hacia edificaciones más sostenibles.

3) *Eficiencia energética en edificaciones*

a) *Definición*

Eficiencia energética significa usar menos energía para realizar el mismo trabajo [25]. La energía es la capacidad de los cuerpos o sistemas para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros. La energía se transforma, se conserva, se degrada y se transfiere principalmente a través de trabajo, ondas y calor. La energía se manifiesta de diferentes maneras como son la energía eléctrica, térmica, cinética, potencial, magnética, química y nuclear.

En el contexto de las edificaciones, la eficiencia energética busca ofrecer una alta Calidad Ambiental Interior (IEQ) a sus ocupantes minimizando el uso de energía y la generación de emisiones de CO_{2e}. La ecuación 2 muestra cómo la eficiencia energética en las edificaciones η_{ee} se ve afectada por la cantidad de energía usada para satisfacer los requerimientos de IEQ, principalmente los de confort térmico, que son los que más demandan recursos energéticos.

$$\eta_{ee} = \frac{\text{Energía Requerida para IEQ}}{\text{Energía Útil Disponible en la Edificación}} = \frac{ER_{IEQ}}{EUD} \quad (2)$$

Dónde:

η_{ee} es la eficiencia energética en las edificaciones

ER_{IEQ} es la energía requerida para satisfacer necesidades de IEQ

EUD es la energía útil disponible en la edificación para satisfacer los requerimientos de IEQ

Mejorar la eficiencia energética en las edificaciones implica integrar estrategias pasivas y activas para lograr un diseño arquitectónico adecuado, así como tener sistemas mecánicos y eléctricos eficientes y llevar a cabo buenas prácticas de operación y mantenimiento. La eficiencia energética en edificaciones tiene impactos significativos en aspectos como el ahorro de dinero por consumo de energía, mejora en la calidad de vida, reducción del deterioro del medio ambiente y mejoras en la economía, seguridad y estabilidad energética de un sector o nación.

b) *Medidas de eficiencia energética*

Las Medidas de Eficiencia Energética (MEE) son un conjunto de acciones, equipos y sistemas diseñados para reducir el uso de energía en sitio de una edificación nueva o existente mientras se satisfacen o mejoran los requerimientos de IEQ, servicio y operación [26].

Las MEE se pueden clasificar en dos categorías: pasivas y activas. Las medidas pasivas, que se abordarán en el capítulo 4, se enfocan principalmente en el diseño arquitectónico, la selección de materiales y la orientación de la edificación para optimizar el uso de recursos naturales. En contraste, las medidas activas que se tratarán en el capítulo 5, implican el uso de sistemas mecánicos o eléctricos eficientes y se centran en optimizar el uso de la energía, reducir el desperdicio de recursos, y mejorar la eficiencia energética de la edificación.

Existen las medidas de no costo o bajo costo que generalmente implican modificar la forma en la que funciona la edificación y pueden ser incorporadas en el presupuesto de operación y mantenimiento. Por otro lado, están las medidas que requieren inversión de capital, que incluyen el reemplazo de equipos que consumen mucha energía o la reconfiguración de sistemas existentes. Además, están las medidas relacionadas con la gestión de la demanda de energía en la edificación, la autogeneración y la cogeneración de energía en sitio.

La identificación de las Medidas de Eficiencia Energética (MEE) se lleva a cabo a través de auditorías energéticas las cuales pueden implicar diferentes niveles de detalle dependiendo de los objetivos del estudio. ASHRAE a través de su guía *“Procedures for Commercial Building Energy Audits”* [26] ha categorizado las auditorías en tres niveles que ofrecen un grado diferente de profundidad y análisis. El nivel I (auditoría energética básica) permite tener una evaluación rápida y visual de la edificación enfocándose en identificar oportunidades de ahorro energético de bajo costo o que no requieren inversiones. El nivel II (auditoría energética intermedia) ofrece una evaluación más detallada, incluyendo un análisis en profundidad del consumo de energía en la edificación, inspección de sistemas y equipos, y entrevistas con el personal de operación y mantenimiento. El nivel III (auditoría energética aplicada) permite tener una evaluación a profundidad del uso de energía durante un período extendido, incorporando simulaciones y estudios de viabilidad técnica y económica de los proyectos de inversión de capital identificados en la auditoría de nivel II.

Sin embargo, antes de realizar cualquier auditoría energética, es importante llevar a cabo un Análisis Preliminar del Uso de Energía (PEA, por sus siglas en inglés). Este análisis permite establecer el punto de partida mediante la definición de las líneas base de consumo y costo de la energía usada en la edificación. En el PEA se analiza el histórico de facturación de los servicios públicos, la demanda máxima y los costos de energía con el objetivo de establecer la Intensidad de Uso de Energía (EUI, por sus siglas en inglés) expresado en kWh/m² por año y el Índice de Costo

de Energía (ECI, por sus siglas en inglés) de la edificación expresado en \$/m² por año. Estos indicadores se comparan con edificaciones similares para evaluar el potencial de mejora en el rendimiento energético de la edificación y reducción de emisiones de CO_{2e}. El éxito en la implementación de las MEE identificadas en las auditorías energéticas dependerá en gran medida de definir el alcance y las expectativas adecuadas hacia el propietario de la edificación.

El principal beneficio generado por la implementación de MEE en las edificaciones es la reducción de los costos asociados al consumo de energía. Sin embargo, existen otros beneficios adicionales a destacar como:

- Reducción del uso de la energía para la climatización de espacios.
- Reducción del uso de la energía para el calentamiento de agua.
- Reducción del uso de electricidad para la iluminación, equipos de oficina y electrodomésticos en general.
- Menores requisitos para mantenimiento.
- Mejora del confort térmico y la Calidad del Aire Interior (IAQ).
- Mejora en la productividad del personal que ocupa la edificación.
- Aumento en el valor de la propiedad.

Según ASHARE [27], se debe priorizar en la implementación de MEE, tanto para edificaciones nuevas como para existentes, antes de llevar a cabo cualquier proyecto de generación de energía renovable in sitio. También indica que a través de varios estudios han podido demostrar que las edificaciones comerciales y multifamiliares que han hecho uso de equipos más eficientes y de prácticas de diseño sostenible disponibles actualmente o que podrían implementarse para 2030, pueden reducir su uso de energía en hasta un 48% en comparación con edificaciones diseñadas con estándares energéticos de 2013, además de mejorar la productividad de sus ocupantes.

c) Uso de energía en edificaciones

El uso de energía en las edificaciones está altamente ligado a satisfacer las necesidades de confort térmico y Calidad del Aire Interior (IAQ) a través de los sistemas de climatización, cubrir los requerimientos de iluminación y las cargas demandadas por sistemas mecánicos, eléctricos o

electrónicos. El desglose del uso de energía típico en edificaciones comerciales y públicas en Colombia en 2018 [28] se muestra en las Fig. 5 y Fig. 6.

De estas imágenes, se puede concluir que entre el 52% y el 84% del uso de la energía eléctrica en los edificios comerciales y públicos en Colombia estuvo relacionado con la necesidad de climatización e iluminación de las edificaciones. Estos factores dependen ampliamente de los procesos de concepción, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las edificaciones. También podemos deducir que los procesos mencionados no han adoptado una visión lo suficientemente sostenible para incorporar estrategias de diseño, construcción y operación que reduzcan la dependencia del uso de energía en la satisfacción de estas necesidades y por ende disminuir las emisiones de CO_{2e} generadas por las edificaciones, limitando así su eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ).

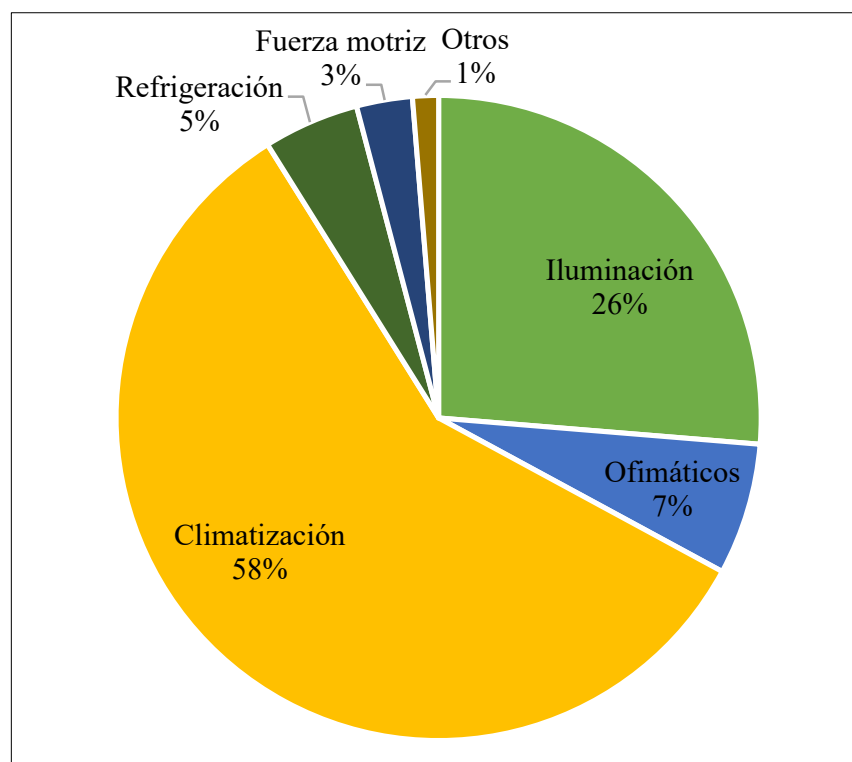


Fig. 5 Distribución del consumo de energía eléctrica de un local promedio del sector comercial

Nota: Figura adaptada de primer balance de energía útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética [28].

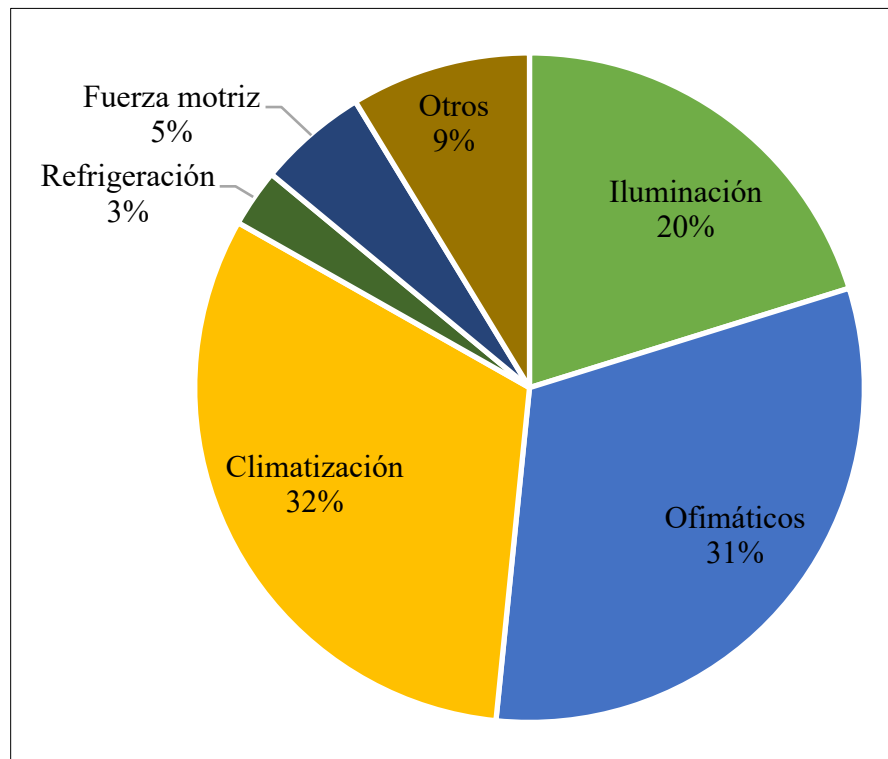


Fig. 6 Distribución del consumo de energía eléctrica de un local promedio del sector público

Nota: Figura adaptada de primer balance de energía útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética [28].

d) Intensidad de uso de energía

La Intensidad de Uso de Energía (EUI, por sus siglas en inglés) es una métrica para medir el consumo de energía de una edificación y así poderlo comparar con otras que tengan su mismo uso [29]. El EUI se calcula dividiendo la energía anual consumida por la edificación entre su área total y típicamente se expresa en kWh/m² por año. La normalización del consumo de energía por unidad de área, permite la comparación directa entre edificaciones de diferentes tamaños, diseños y ubicaciones, facilitando la identificación de aquellos con mayor o menor eficiencia energética.

El EUI se usará como el indicador para definir la línea base de consumo de energía en el edificio seleccionado para el caso de estudio y de esta manera identificar los aspectos que requieren intervención como los sistemas de climatización, iluminación, o la envolvente de la edificación. Además, servirá de punto de partida para establecer las medidas y las metas de eficiencia energética a corto, mediano y largo plazo.

Dentro de las limitantes que tiene usar el EUI es que mide la cantidad total de energía consumida, pero no diferencia entre fuentes de energía renovables y no renovables. Además, los valores de referencia de línea base de consumo de energía pueden variar entre países.

e) Herramientas de análisis y simulación

Las herramientas de análisis y simulación son complementos a la actividad creativa e intelectual de diseño, la cual depende exclusivamente de la experiencia, formación profesional y creatividad de las personas a cargo de diseñar.

Existen diversas herramientas de análisis y simulación de la eficiencia energética de una edificación que van desde cálculos manuales básicos, simulaciones computacionales de edificaciones completas, hasta plataformas para evaluar y calificar el rendimiento energético de las edificaciones nuevas y existentes. Estas herramientas varían de acuerdo con su precisión y están diseñadas para diferentes tipos de análisis, los cuales requieren diferentes niveles de dedicación y costo. Sin embargo, la precisión de los cálculos de ahorro depende más de la fiabilidad de los datos de entrada que de la herramienta misma; por lo tanto, las herramientas más complejas generan menos valor si se basan en supuestos incorrectos.

Para el caso de estudio de este proyecto se usará el software DesignBuilder [30] el cual representa una de la más potentes herramientas de análisis energético y medioambiental de edificaciones en la actualidad. Este software cuenta con una interfaz de simulación energética con acceso al motor de cálculo de EnergyPlus v9.4, uno de los programas de simulación más avanzados del mundo financiado en Estados Unidos por la Oficina de Tecnologías de Construcción (BTO) del Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos y administrado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). En DesignBuilder se realizará un modelo 3D del edificio seleccionado para el caso de estudio y se llevarán a cabo simulaciones para determinar la carga térmica demandada, los niveles de iluminación natural, las horas de sol anuales recibidas a través de su envolvente, la ventilación natural y el consumo de energía con base en la información recolectada en campo.

Complementariamente se usará el programa de ASHRAE “*Building Energy Quotient*” (bEQ, por sus siglas en inglés) [31], el cual es una herramienta útil en la preparación de una auditoría energética nivel I, la identificación de Medidas de Eficiencia Energética (MME) de no costo o bajo costo y en la realización de encuestas de calidad ambiental interior (IEQ) que

complementan la información para determinar qué tan buena es o no una edificación en términos de su consumo de energía. ASHRAE bEQ ofrece un portal mediante el cual los usuarios registran los datos necesarios para calcular el rendimiento energético de una edificación a través de dos componentes: “*As Designed*” (como fue diseñado) y “*In Operation*” (en operación). Además, ayuda a los propietarios y operadores a entender cómo se usa la energía en sus edificaciones y cómo se puede mejorar la eficiencia energética, ya sea mediante MME pasivas o activas y/o cambios en la forma de operar las edificaciones. La utilización de ASHRAE bEQ también puede facilitar la obtención de certificaciones energéticas y contribuir al aumento del valor de la edificación.

4) *Diseño pasivo de edificaciones*

a) *Definición de diseño pasivo*

El diseño pasivo de edificaciones es una estrategia de diseño arquitectónico sostenible que tiene como objetivo principal mantener niveles aceptables de confort térmico y Calidad del Aire Interior (IAQ) para los ocupantes. Requiere el entendimiento de los flujos naturales de energía generados por el clima y su entorno a través de la envolvente de la edificación para proyectar el máximo beneficio y reducir o eliminar la dependencia de los sistemas mecánicos y eléctricos de enfriamiento, calefacción e iluminación [32].

La clave en el diseño pasivo de edificaciones radica en analizar cómo se puede aprovechar el clima local y su entorno, lo cual implica que la clasificación y sus características deban considerarse desde las etapas de planificación y análisis del sitio con el fin de tener información suficiente que permita definir las estrategias y técnicas apropiadas a usar para lograr la máxima eficiencia energética en la edificación y garantizar el confort térmico para sus ocupantes.

b) *Integración en el diseño arquitectónico sostenible*

El diseño arquitectónico sostenible debe involucrar estrategias y técnicas de diseño pasivo y el uso de sistemas de enfriamiento, calefacción e iluminación eficientes energéticamente para ofrecer niveles óptimos de Calidad Ambiental Interior (IEQ). Lo anterior, se puede lograr más fácilmente si se comprende la lógica del enfoque de tres niveles para el diseño de edificaciones sostenibles que se muestra en la Fig. 7. En esta imagen, los niveles uno y dos son de dominio del diseñador arquitectónico. Las decisiones de diseño arquitectónico en estos dos niveles pueden

reducir el consumo de energía de las edificaciones hasta en un 80% [33]. El nivel 1 hace referencia a todas las decisiones que deben tomarse durante las etapas conceptuales del diseño de cualquier edificación. Un aspecto importante para tener en cuenta en este nivel es que cuando el diseñador arquitectónico tiene como objetivo reducir el consumo de energía a medida que se toman estas decisiones, la edificación en sí puede cubrir alrededor del 60% de las necesidades de enfriamiento, calefacción, e iluminación. El nivel 2, implica el uso de energías naturales a través de métodos tales como enfriamiento y calefacción pasivos y sistemas de iluminación natural. Las decisiones adecuadas en este punto pueden reducir el consumo de energía otro 20% aproximadamente. Finalmente, en el nivel 3 se deben seleccionar los sistemas mecánicos y eléctricos lo más eficientes energéticamente posible, lo que puede llegar a reducir el consumo de energía otro 5%.



Fig. 7 Enfoque de tres niveles para el diseño de edificaciones sostenibles de un edificio

Nota: 1) Todos los elementos con un asterisco son parte del diseño sensible a la energía solar. 2) Imagen adaptada del enfoque de tres niveles para calefacción, enfriamiento e iluminación de edificaciones sostenibles [34].

c) *Análisis del clima*

El clima es principalmente una función del sol y de la geografía; analizarlo y comprenderlo es fundamental en el diseño pasivo de edificaciones. Las variaciones en el clima son causadas principalmente por la diferencia entre la cantidad de calor que recibe la atmósfera desde el sol y la

cantidad que se emite de regreso al espacio desde la Tierra [12]. Esta diferencia genera un conjunto de condiciones atmosféricas, como la temperatura, humedad, viento, radiación solar, precipitación, presión atmosférica, nubosidad y brillo solar que predominan en un lugar y momento determinados. Los valores de estas condiciones atmosféricas son tomadas de estaciones meteorológicas cercanas al lugar, preferiblemente recopilados por un amplio periodo de tiempo.

El clima puede clasificarse como global, zonal y regional o local (microclima), según se refiera al planeta en su totalidad, a una zona en particular, o a una región o lugar específico, respectivamente. Para caracterizar el clima de un lugar, generalmente basta con definir los valores de las cinco primeras variables mencionadas anteriormente, las cuales se detallan más adelante [35]. Los datos que definen estas variables deben analizarse anualmente, evaluando tanto los valores diarios máximos y mínimos absolutos, así como los valores medios máximos y mínimos, y los valores promedio. Este análisis permite un entendimiento particularizado de las fluctuaciones y tendencias climáticas a lo largo del año. Sin embargo, hay una serie de factores que pueden influir sobre estas variables y que deben ser tenidas en cuenta, como la posición geográfica (latitud y longitud), la altitud del lugar, la orientación con respecto a la incidencia de los rayos solares o a los vientos predominantes, las corrientes oceánicas y la distancia con respecto al mar.

A continuación se describen las principales variables atmosféricas para caracterizar el clima de un lugar:

- 1. Temperatura.** La temperatura del aire es la condición atmosférica más importante para la climatización de edificaciones y el confort térmico en entornos externos e internos. La temperatura es una medida del grado de calor o frío del entorno y usualmente se mide entre 1.2 y 1.8 metros sobre el nivel del piso como la temperatura de bulbo seco, la cual se refiere a la temperatura medida por un termómetro expuesto al aire, protegido de la radiación directa y otras influencias del medio ambiente. Los valores de temperatura se expresan en grados Celsius (°C).
- 2. Humedad.** La humedad tiene una alta incidencia en el confort térmico, la Calidad del Aire Interior (IAQ) y la preservación de los materiales de la edificación. La humedad se expresa frecuentemente como humedad relativa, es decir, la proporción de vapor de agua presente en el aire comparada con la cantidad máxima que el aire puede contener a una determinada temperatura, expresada en porcentaje (%).

3. **Viento.** El viento, con la temperatura y la humedad del aire, también juega un papel importante en el confort térmico. Además, la orientación adecuada de la edificación en relación con las direcciones del viento prevalecientes puede contribuir al enfriamiento natural de las edificaciones. La velocidad y dirección del viento en un lugar específico son influenciadas por la topografía del terreno, así como por el tipo y la densidad de construcciones cercanas, y deberán ser ajustadas teniendo en cuenta estas condiciones. La velocidad del viento se expresa en metros por segundo (m/s), mientras que la dirección en grados (°).
4. **Radiación solar.** La radiación solar tiene un papel fundamental en diversos procesos atmosféricos, climáticos y biológicos, y tiene un impacto significativo en el confort térmico y en el análisis de las cargas térmicas de una edificación. La radiación solar es la energía emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas y su intensidad se mide comúnmente en vatios por metro cuadrado (W/m²). Esta energía es la fuente principal de calor y luz para la Tierra y se divide en dos componentes: Directa y difusa.
 - **Radiación directa.** Es aquella que llega hasta la superficie terrestre directamente desde el sol. Es la más intensa y varía según la posición del sol a lo largo del día.
 - **Radiación difusa.** Esta radiación es la que ha sido dispersada en la atmósfera y reflejada antes de llegar a la superficie terrestre. La intensidad de la radiación difusa es menor que la radiación directa y está presente de manera constante durante el día, incluso ante condiciones de cielo nublado.
5. **Precipitación.** La precipitación se refiere a cualquier tipo de agua que cae desde la atmósfera, incluyendo lluvia, granizo, entre otros. Este fenómeno ocurre cuando el vapor de agua en el aire se condensa debido al enfriamiento de masas de aire y su caída se presenta cuando la condensación alcanza una masa crítica suficiente. En el contexto de las edificaciones, es importante tener en cuenta la intensidad y la dirección de la precipitación, así como identificar si las lluvias intensas están acompañadas de vientos fuertes. La precipitación se expresa en milímetros (mm), donde 1 mm representa 1 litro de agua por metro cuadrado de superficie.

Como complemento a las cinco variables climáticas definidas anteriormente, están la presión atmosférica, la nubosidad y el brillo solar las cuales están interrelacionadas y tienen incidencia en el confort térmico y la eficiencia energética de las edificaciones. La presión atmosférica se expresa generalmente en pascales (Pa), incide directamente en la densidad del aire

y como consecuencia influye en la ventilación natural y en la distribución del aire dentro de las edificaciones, afectando la Calidad del Aire Interior (IAQ) y la sensación térmica de las personas. Por otro lado, la nubosidad, se estima y se expresa en octavos o decimas del cielo cubierto y es el factor climático más importante que contribuye a la moderación de la radiación solar directa en un lugar, reduciendo de esta manera la ganancia térmica proveniente del sol y teniendo una alta incidencia en la iluminación natural de las edificaciones. Por último, el brillo solar es la forma más segura de medir la radiación solar indirecta en un lugar. Se mide en horas de sol al día y determina la cantidad de luz solar recibida, incidiendo en las necesidades de climatización de una edificación. Los valores de radiación y brillo solar en Colombia pueden encontrarse en el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia [36], el cual es una herramienta para la valoración de la disponibilidad de la energía solar en Colombia y para conocer el comportamiento de la radiación ultravioleta, el ozono y sus relaciones e impacto sobre la salud humana.

Otro aspecto importante sobre el análisis del clima es definir la zona climática a la que pertenece el lugar que se está analizando. Existen diversas formas de clasificar el clima de acuerdo con su ubicación geográfica y las condiciones de temperatura y precipitación como son la clasificación de Köppen-Geiger o Thornthwaite, así como las que se clasifican según su latitud o según normas internacionales como la ISO 7730. Sin embargo, en el campo de la climatización de edificaciones es muy común usar la clasificación de zonas climáticas de ASHRAE que se basa en datos meteorológicos históricos y los conceptos de Grados-Día de Enfriamiento o “*Cooling Degree-Days (CDD)*” y Grados-Día de Calentamiento o “*Heating Degree-Days (HDD)*”. Según ASHRAE [37], un Grado-Día corresponde a la diferencia de temperatura entre la temperatura media exterior durante un período de veinticuatro horas y una temperatura base determinada. Para el caso de calentamiento, la temperatura base es 18°C por lo que es común definir el HDD18 como el número de grados-día en que la temperatura media diaria de un lugar está por debajo de los 18°C. Por otra parte, está el enfriamiento donde la temperatura base es 10°C por lo que es típico definir el CDD10 como el número de grados-día en que la temperatura media diaria de un lugar supera los 10°C. Por ejemplo, si la temperatura promedio de un día es 25°C, habrá 15 Grados-Día de Enfriamiento ($25^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 15^{\circ}\text{C}$).

Las zonas climáticas de ASHRAE se enumeran de 0 a 8 como se muestra en la TABLA II donde las zonas de numeración más baja representan climas más calurosos y las más altas climas más fríos. Además, cada zona se subdivide en categorías dependiendo de la precipitación anual

acumulada del lugar para indicar si el clima es húmedo (A), seco (B) o marino (C) de acuerdo con los siguientes criterios:

1. Definición de húmedo (A). Lugares que no son marinos (C) y no son secos (B)

2. Definición de seco (B). Lugares que cumplen con los siguientes criterios:

- No marino (C).
- Si el 70% o más de la precipitación P ocurre durante un período altamente soleado, entonces el umbral seco/húmedo es: $P < 20.0 \times (T + 14)$.
- Si entre el 30% y el 70% de la precipitación P ocurre durante un período altamente soleado, entonces el umbral seco/húmedo es: $P < 20.0 \times (T + 7)$.
- Si el 30% o menos de la precipitación P ocurre durante un período altamente soleado, entonces el umbral seco/húmedo es: $P < 20 \times T$.

Donde P es la precipitación anual en milímetros (mm) y T es la temperatura media anual en grados Celsius (°C).

3. Definición de Marino (C). Lugares que cumplen con los siguientes criterios:

- Temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C .
- Temperatura media del mes más cálido $< 22^{\circ}\text{C}$.
- Al menos cuatro meses con temperaturas medias superiores a 10°C .
- Temporada seca en verano. El mes con la precipitación más intensa en la estación fría tiene al menos tres veces más precipitación que el mes con la menor precipitación en el resto del año. La estación fría es de octubre a marzo en el hemisferio norte y de abril a septiembre en el hemisferio sur.

TABLA II DEFINICIÓN DE ZONAS CLIMÁTICAS ASHRAE

Zona Climática	Nombre	Criterio de definición
0	Extremadamente Caliente	$6,000 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C}$
1	Muy Caliente	$5,000 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C} < 6,000$
2	Caliente	$3,500 < \text{CDD}10^{\circ}\text{C} < 5,000$
3	Cálido	$\text{CDD}10^{\circ}\text{C} < 3,500$ and $\text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 2,000$
4	Mixto	$\text{CDD}10^{\circ}\text{C} < 3,500$ and $2,000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 3,000$
5	Fresco	$\text{CDD}10^{\circ}\text{C} \leq 3,500$ and $3,000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} \leq 4,000$
6	Frío	$4,000 < \text{HDD}18^{\circ}\text{C} < 5,000$

7	Muy Frío	5,000 < HDD18°C < 7,000
8	Subártico / ártico	7,000 < HDD18°C

Nota: Información tomada del anexo 1 del ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019 (I-P) [37].

Para caracterizar el clima de Cali contamos con dos fuentes de información, una ubicada en la Sede Meléndez de Univalle que se encuentra al sudeste de la ciudad a unos 6.2 km de distancia de la EEU y que cuenta con una estación meteorológica que nos permite tener a disposición de este proyecto un poco más de 123,000 datos en Excel de temperatura, humedad relativa, viento y radiación solar entre el 2013 y 2023 (10 años). La otra fuente de información es la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón de la ciudad de Palmira y que está ubicada a unos 21.5 km al nordeste de la Escuela de Enfermería de Univalle EEU, aproximadamente.

Por cercanía a la EEU se procesarán y usarán los datos de la Sede Meléndez de Univalle para definir las condiciones climáticas de Cali mostradas en las figuras 8 a 11, excepto los datos de precipitación anual. Sin embargo, para efectos de simulación en DesignBuilder se tendrán en cuenta los datos del aeropuerto de Palmira ya que este software requiere para sus procesos de simulación un archivo climático en formato “epw” (*“Energy Plus Weather”*) el cual debe ser obtenido directamente desde su plataforma en línea para su correcto funcionamiento.

La Fig. 8 y la Fig. 9 presentan los valores de temperatura de bulbo seco y humedad relativa, máximos, mínimos y promedio durante 10 años. La temperatura de bulbo seco y humedad relativa promedio anual en Cali durante las 24 horas es 24.2°C y 77.8%. Sin embargo, para efectos del análisis de confort térmico se tendrán en cuenta los valores que están entre las 7 AM y las 9 PM, los cuales corresponden a la franja horaria en la que funciona la EEU. Por lo anterior, se podría definir que las temperaturas de bulbo seco oscilan en promedio entre los 18.6°C y 32.2°C, mientras que la humedad relativa varía entre 35.6% y 98.5%. Es importante destacar que en la franja horaria entre las 12 PM y las 5 PM, las temperaturas de bulbo seco promedio van desde los 31.1°C hasta los 33.8°C con humedades relativas correspondientes a 48.1% y 38.3% lo que beneficia el uso de sistemas híbridos como el enfriamiento evaporativo y el enfriamiento radiante.

La Fig. 10 muestra la rosa de los vientos dividida en intervalos de 3 horas para tener una perspectiva más precisa de como varían la dirección y la frecuencia del viento durante las 24 horas del día. A partir de esta imagen se puede concluir que durante el día entre las 6 AM y las 6 PM, el viento tiene una dirección predominante desde el sureste con porcentajes de frecuencia que

alcanzan hasta el 15% - 20% entre el mediodía y el final de la tarde, mientras que en las primeras horas de la mañana se tienen vientos desde el suroeste con frecuencias que van desde el 10% hasta el 15% sobre el mediodía. Durante la noche entre las 6 PM y las 6 AM, el viento predomina desde el suroeste pero con velocidades más bajas y frecuencias que van disminuyendo progresivamente desde el 20% hasta por debajo del 10%. Además, de los datos registrados en Univalle, se tiene que la velocidad promedio del viento durante las 24 horas es de 0.67 m/s mientras que en franja horaria entre las 7 AM y las 9 PM es de 0.78 m/s donde las velocidades más altas ocurren entre las 3 PM y las 7 PM con un valor promedio de 1.16 m/s.

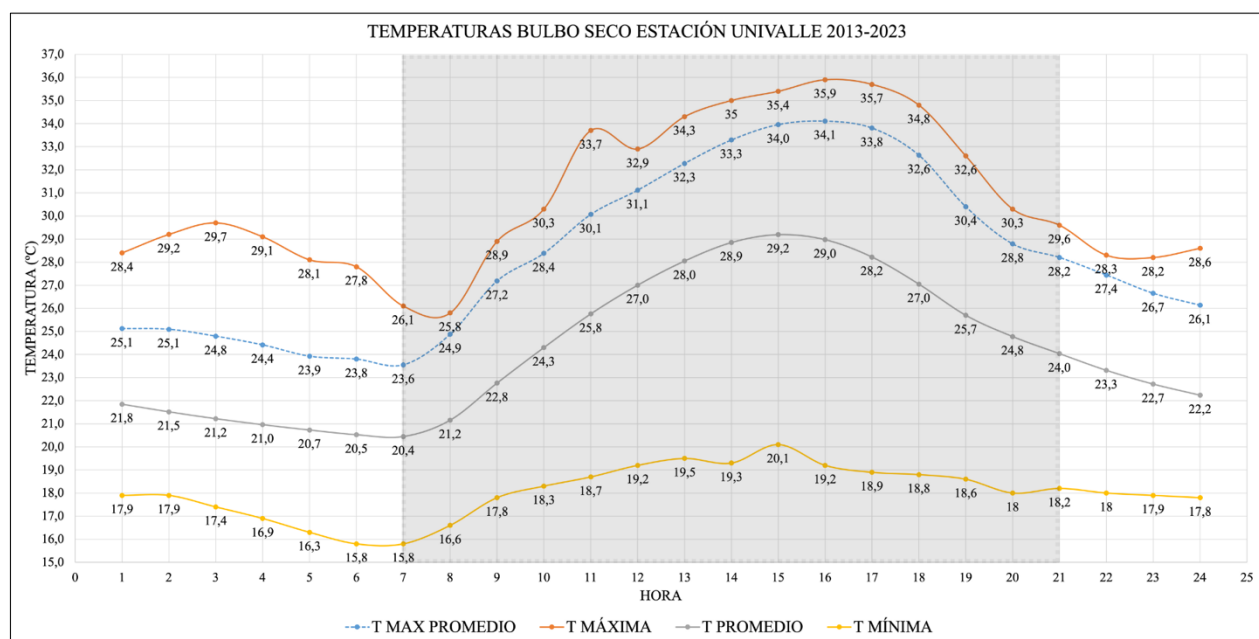


Fig. 8 Temperatura de bulbo seco estación Univalle 2013 – 2023

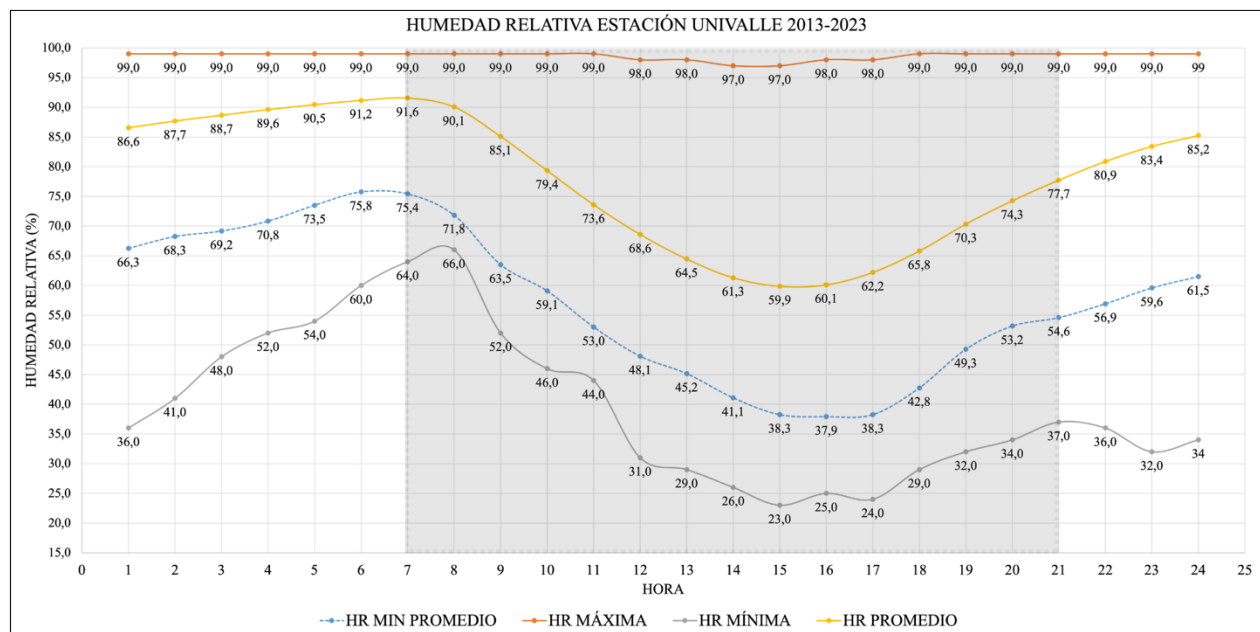


Fig. 9 Humedad relativa estación Univalle 2013 – 2023

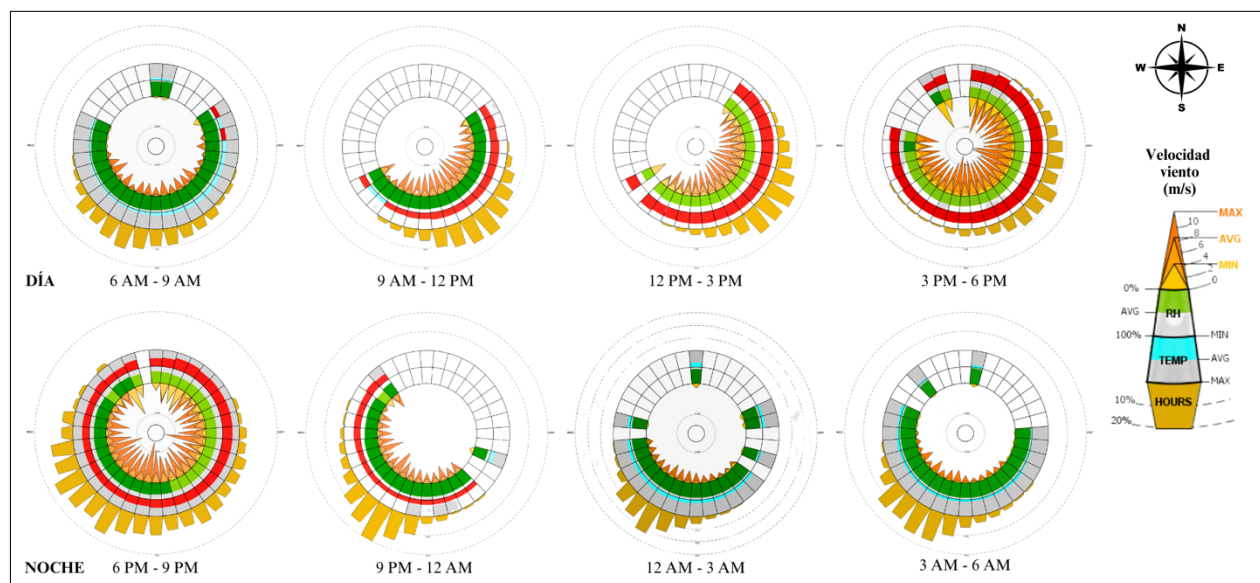


Fig. 10 Rosa de vientos día y noche estación Univalle 2013 – 2023

En la Fig. 11 se observan los valores de radiación solar máxima, mínima y promedio donde justo sobre el mediodía se tienen valores que están entre 857 y 1,139 W/m² asumiendo un cielo despejado. Sin embargo, si analizamos una franja horaria entre las 10 AM y 2 PM la radiación solar promedio está alrededor de 630 W/m² asumiendo también un cielo despejado. Relacionado con estos datos está el brillo solar, que según el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de

Colombia [36], en la Sede Meléndez de Univalle el brillo solar anual promedio es de 5.1 horas, alcanzando un máximo de 6 horas en julio y agosto y un mínimo de 4.5 horas en noviembre. Sin embargo, las horas de brillo solar se ven afectadas por factores como la nubosidad, la cual es difícil de estimar, pero que termina impactando la cantidad real de radiación disponible. Estos datos y consideraciones serán fundamentales en el análisis de viabilidad técnica del uso de energía solar fotovoltaica en la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU).

La información para caracterizar la precipitación en Cali se obtiene del “Estudio para la Microzonificación Climática para el Municipio de Santiago de Cali” [38], donde se establece que la precipitación varía aproximadamente desde los 1,200 mm por año en la zona plana, que corresponde al área urbana en el sector noreste, hasta los 3,000 mm por año en la zona montañosa de los Farallones de Cali. La precipitación media mensual se caracteriza por tener dos períodos lluviosos entre marzo - mayo y octubre - noviembre; y dos períodos de menos precipitaciones entre diciembre - febrero y junio - septiembre. En este informe también se define que las precipitaciones máximas promedio se registran en el mes de abril (232 mm) y las mínimas en agosto (69 mm).

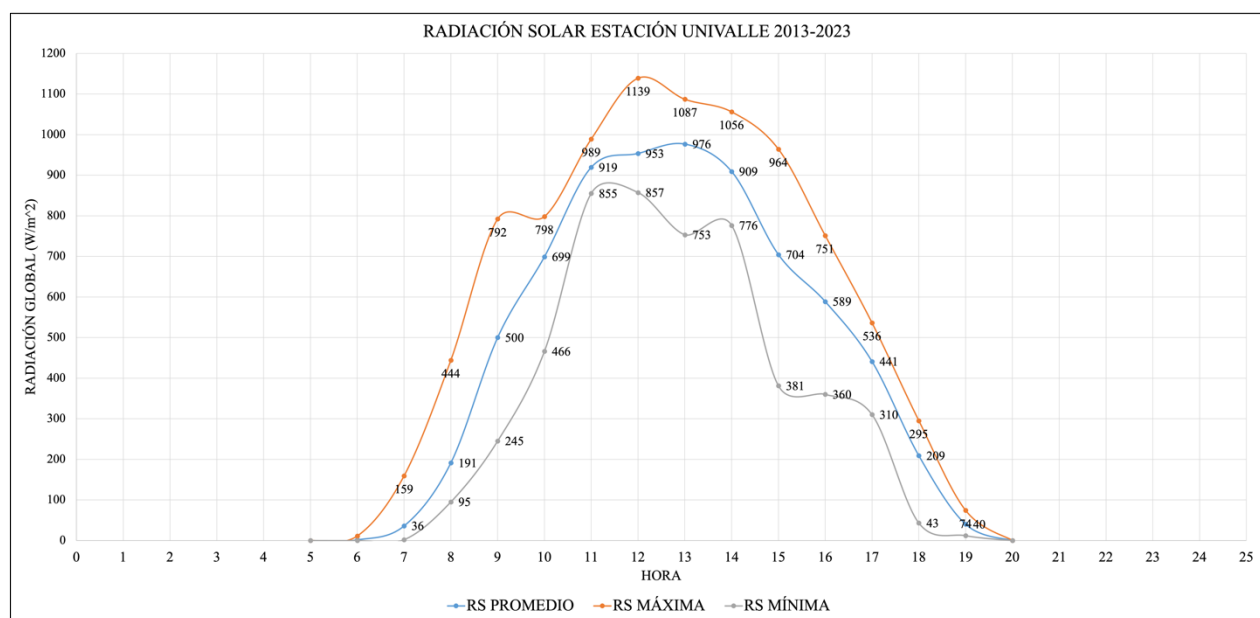


Fig. 11 Radiación solar estación Univalle 2013 – 2023

Como se mencionó anteriormente, los datos de precipitación y temperatura media anual son útiles para determinar la zona climática a la que pertenece un lugar. Ahora, con base en la TABLA II y los criterios para indicar si el clima es húmedo (A), seco (B) o marino (C), podemos definir

que Cali presenta las características de un clima tropical muy caliente y húmedo correspondientes a una zona climática **ASHRAE 1A**. Esto se debe a que el CDD10 es 5,740 y está dentro del rango de “muy caliente” (entre 3,500 y 6,000). Además, no se cumplen con los criterios para ser marino (C) ni para ser seco (B) ya que los valores de precipitación anual (P) son de 1,200 mm y la temperatura media anual (T) es de 24.2°C.

d) Análisis del sitio

El análisis del sitio es una etapa crucial en el diseño pasivo de edificaciones ya que permite evaluar los recursos naturales disponibles y aprovechables en el entorno donde se va a ubicar la edificación y cómo estos pueden incidir en las condiciones climáticas del sitio. Para este análisis son de gran utilidad los diagramas de trayectoria solar y las máscaras de sombra los cuales permiten determinar qué impacto tendría el sitio sobre el confort térmico de la edificación y cómo la radiación solar puede ser aprovechada para sistemas fotovoltaicos o cómo puede incidir en la transferencia de calor a través de la edificación. Además, el análisis del sombreado que ofrecen los elementos del entorno como árboles o edificaciones vecinas sobre la edificación es fundamental para planificar la ubicación, el tipo y los usos de las áreas según más convenga.

Como se observa en la Fig. 12, la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) – Sede San Fernando está ubicada en el departamento del Valle del Cauca en Colombia, al suroeste del perímetro urbano de la ciudad de Cali. Sus coordenadas geográficas son 3°25'51"N – 76°32'46"W que lo ubican entre las calles 5 y 4B y las carreras 36 y 37. El terreno donde se sitúa la escuela tiene una altitud de 987 metros sobre el nivel del mar y la fachada norte está orientada 13° hacia el este. Los límites de la edificación muestran que sobre la fachada oeste se encuentra la calle 4B, en el lado norte está el Centro Deportivo Universitario (CDU) de Univalle y sobre los costados este y sur está el Hospital Universitario del Valle.

En la Fig. 13 se observa que la EEU está rodeada de árboles frondosos que miden entre 10 y 15 metros de altura y que generan una sombra significativa a las fachadas oeste, este y sur, así como a una parte del techo en el costado oeste. Este entorno sombreado favorece las condiciones ambientales en cuanto a confort térmico de la edificación al disminuir el área de exposición directa a la radiación solar, sin embargo, afecta la capacidad de iluminar naturalmente los espacios a través de sus ventanas. También se puede apreciar que la EEU no tiene edificios vecinos que generen sombra o algún tipo de obstáculo para la ventilación natural, sin embargo, su ubicación cercana a

una vía principal como la calle 4B hace que se deban contemplar aspectos relacionados con la calidad del aire exterior producto de los contaminantes generados por los vehículos que transitan constantemente por este sector.

La Fig. 14 muestra la vista de planta del modelo 3D de la EEU realizado en DesignBuilder a partir de imágenes satelitales de Google Earth junto con la información de planos de AutoCAD y la registrada en sitio. Con base en este modelo se llevó a cabo el análisis de incidencia y trayectoria solar para el equinoccio en marzo y los solsticios de junio y diciembre el día 21 a las 9 AM y 3 PM, como se muestra en la Fig. 15.

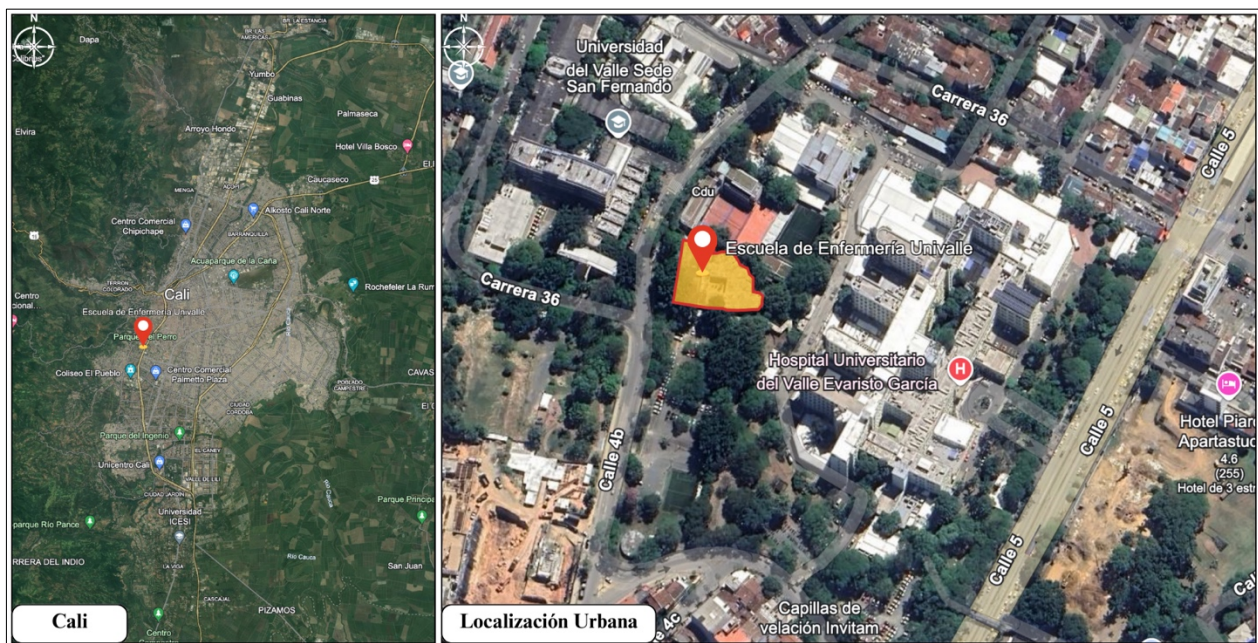


Fig. 12 Localización Escuela de Enfermería de la Universidad del Valle



Fig. 13 Entorno Escuela de Enfermería de la Universidad del Valle

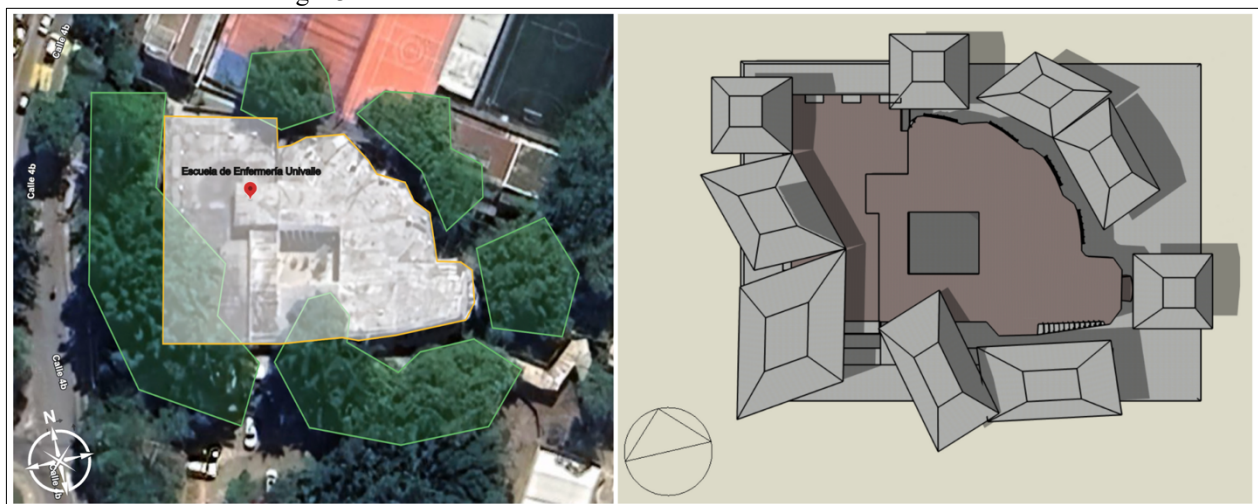


Fig. 14 Vista de planta de modelo 3D de la Escuela de Enfermería de Univalle

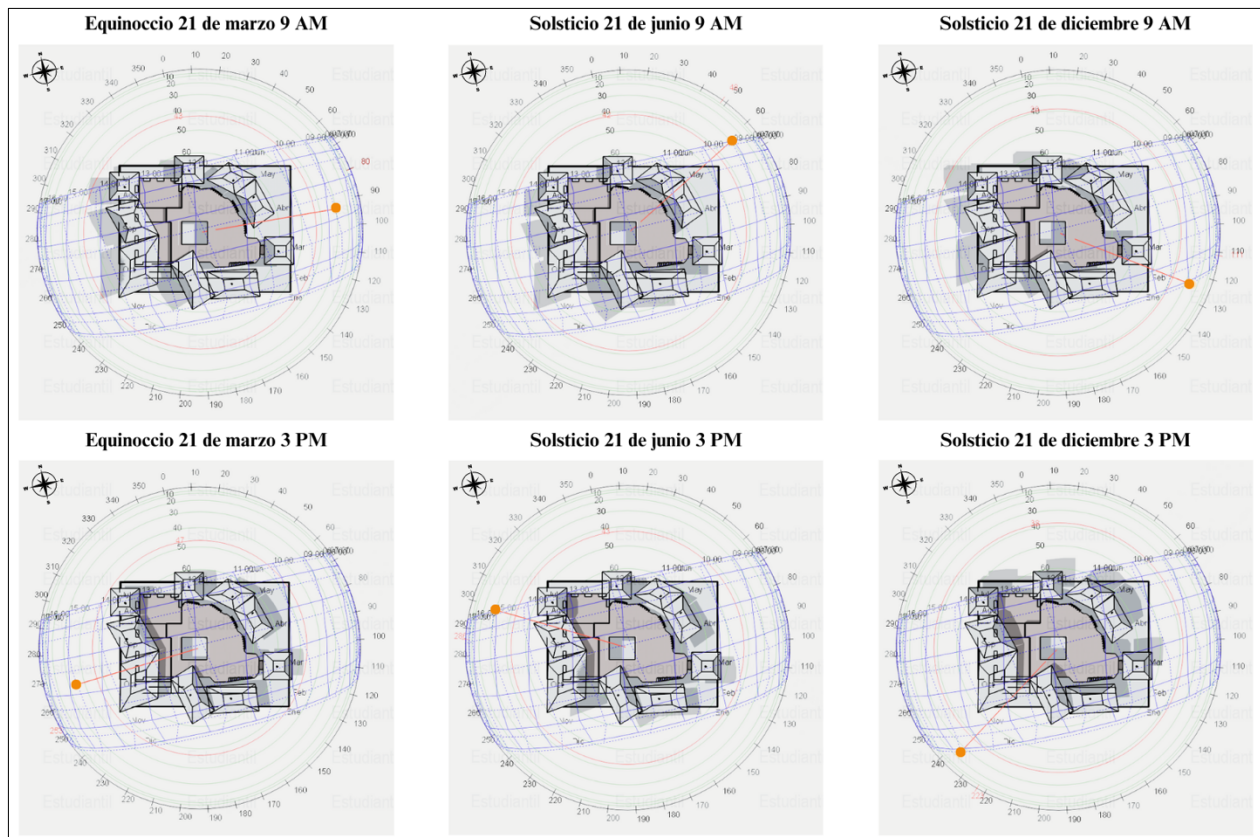


Fig. 15 Análisis de incidencia y trayectoria solar equinoccio y solsticios de la Escuela de Enfermería de Univalle

De la Fig. 15 se puede confirmar que las fachadas más expuestas a la radiación solar durante la mañana en los solsticios de junio y diciembre son la noreste y sureste, mientras que en la tarde la fachada más expuesta es la noreste. En el equinoccio el patrón de sombras es equilibrado, con una exposición moderada a la radiación solar en todas las fachadas a lo largo del día. En los diagramas de incidencia y trayectoria solar también se observa que gran parte del techo permanece expuesto a la radiación solar directa, lo cual no es favorable en términos de ganancias de calor y confort térmico pero si puede llegar a favorecer la implementación de energías renovables como los paneles solares fotovoltaicos o tragaluces para iluminación natural. Otro aspecto relevante a tener en cuenta es que las sombras generadas por los árboles podrían afectar la entrada de luz natural a través de las ventanas de las fachadas generando la necesidad del uso de iluminación artificial permanente en las áreas.

e) Estrategias y técnicas de diseño pasivo de edificaciones

El diseño pasivo de edificaciones hace uso de estrategias y técnicas orientadas a reducir la demanda de energía proveniente de fuentes no renovables para la operación de la edificación y así reducir las emisiones de CO_{2e} asociadas con su operación. Las estrategias son enfoques generales o métodos que deben ser considerados en las etapas de diseño y planificación de una edificación y se utilizan para alcanzar los objetivos de eficiencia energética y confort térmico sin recurrir a sistemas mecánicos o eléctricos. Por otro lado, las técnicas son métodos específicos para implementar estas estrategias durante la construcción, operación y mantenimiento.

Las estrategias pueden clasificarse en dos categorías: Generales y Específicas. Las estrategias específicas, como el enfriamiento pasivo de la edificación, se tratarán con más detalle teniendo en consideración que la zona climática de Cali corresponde a un clima muy caliente y húmedo según lo definido en el literal “c” de este capítulo. Adicionalmente y complementando lo que otros autores [39] y [40] han definido, las estrategias pueden agruparse bajo cuatro principios fundamentales como son:

- 1. Optimización de la envolvente⁹ y uso de recursos naturales.** Bajo este principio se busca mejorar el confort térmico y la eficiencia energética de la edificación en términos generales controlando las condiciones ambientales a través de la envolvente de la edificación y la evaluación del uso de los recursos naturales disponibles en sitio.
- 2. Protección contra ganancias de calor.** Tiene como objetivo minimizar las ganancias de calor externas e internas que provoquen un aumento de la temperatura interior de la edificación y afecten el confort térmico. Las ganancias de calor externas son las provenientes principalmente de la radiación solar y la temperatura ambiente exterior, mientras que las ganancias de calor internas están relacionadas con las personas, la iluminación artificial, y cualquier equipo mecánico o eléctrico que emita calor. La contribución de cada tipo de ganancia de calor depende de la envolvente y del uso de la edificación
- 3. Modulación de calor.** Se busca que las ganancias de calor sean reguladas mediante la capacidad que tengan los materiales que hacen parte de la estructura y la envolvente de la edificación para almacenar y posteriormente liberar el calor de manera controlada. La

⁹ Envolvente es el conjunto de elementos que separan y protegen el interior de una edificación del ambiente exterior. Estos elementos incluyen las paredes exteriores, techos, suelos, ventanas, puertas y otros componentes de la estructura.

capacidad de almacenamiento térmico de los materiales influye en como la edificación absorbe calor en el día y lo puede liberar en la noche, lo cual depende ampliamente de la masa térmica de la edificación.

- 4. Disipación de calor.** Se enfoca en reducir la carga térmica en la edificación que no ha podido evitarse o modularse mediante los principios anteriores, ya sea con enfriamiento pasivo o sistemas híbridos, y de esta manera minimizar el uso de sistemas mecánicos de climatización. La disipación del exceso de calor depende de cuatro factores principales: la disponibilidad de un disipador de calor ambiental (aire, agua o cielo), el diseño arquitectónico, los materiales usados para la construcción, y la transferencia de calor entre la edificación y la fuente disipadora de calor. Dentro de las estrategias más comunes de enfriamiento pasivo están la ventilación natural, el enfriamiento evaporativo, y el enfriamiento radiativo, mientras que el enfriamiento radiante se destaca dentro de los sistemas híbridos más utilizados y exitosos.

La Fig. 16 muestra de manera jerárquica como las estrategias (en azul) y las técnicas (en verde) pueden agruparse de acuerdo con el principio (en naranja) que las rige y la categoría (en amarillo) a la cual pertenecen. Esta estructura también es coherente con el enfoque de tres niveles mostrado en la Fig. 7 y consistente con la forma en que se desarrollarán en este capítulo.

Dentro de las estrategias de diseño pasivo más estudiadas y adoptadas hoy en día se encuentran la forma y orientación de la edificación, uso de materiales locales y diseño de paisajismo, mientras que dentro de las técnicas se incluyen el aislamiento térmico de superficies, muros y techos verdes, protección solar, acristalamiento óptimo, ventilación natural, iluminación natural, enfriamiento evaporativo, materiales de cambio de fase, y el muro Trombe [41]. Estas estrategias y técnicas pueden complementarse con el uso de tecnologías pasivas y/o activas, controles personalizables orientados a satisfacer requerimientos de Calidad Ambiental Interior (IEQ) particulares, y nuevas tendencias de construcción como el diseño biofílico¹⁰.

¹⁰ El diseño biofílico se centra en emular la naturaleza incorporando elementos naturales tanto en el interior como en el exterior de las edificaciones.

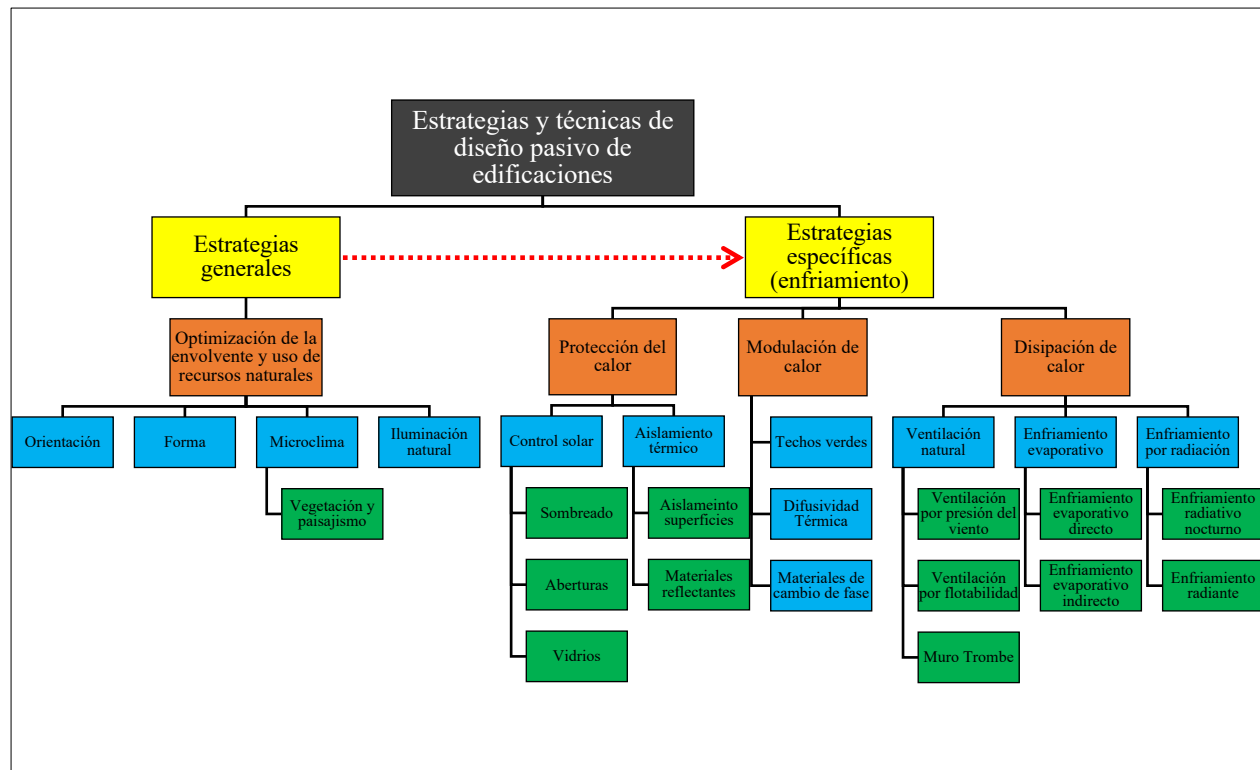


Fig. 16 Estrategias y técnicas de diseño pasivo de edificaciones

Nota: La línea punteada roja indica que las estrategias generales contribuyen al enfriamiento pasivo al reducir las cargas térmicas de la edificación.

A continuación, se definen de manera general cada una de las doce estrategias y sus respectivas técnicas de acuerdo con la Fig. 16. En los numerales 1 a 4 se tratarán las estrategias correspondientes al principio de Optimización de la Envolvente y Uso de recursos Naturales, en los numerales 5 y 6 se abordarán las relacionadas con el principio de Protección de Calor, en los numerales 7, 8 y 9 se tratarán las correspondientes al principio de Modulación de Calor y en los numerales 10, 11 y 12 las relacionadas al principio de Disipación de Calor.

- 1. Orientación.** La orientación determina la exposición solar de la edificación y es crucial para definir las estrategias de diseño pasivo que favorecen los aspectos relacionados con la IEQ y la eficiencia energética. En climas como el de Cali, las edificaciones deben orientarse para tener espacios interiores y exteriores sombreados y frescos, mientras que, en climas fríos deben permitir la captación de luz solar para tener espacios soleados y protegidos contra el viento. Víctor Olgyay en su libro *“Design with Climate”* [42], considera que la orientación de la

edificación está determinada por factores como la topografía local, los requerimientos de privacidad y vistas al exterior, control de los niveles de ruido, y los factores climáticos relacionados con el viento y la radiación solar. En latitudes cercanas al Ecuador la trayectoria solar favorece que las edificaciones orienten sus fachadas más largas sobre el eje norte-sur para optimizar la captación de luz natural mientras que las fachadas este y oeste deben ser las más cortas y protegidas contra el sol para evitar el sobrecalentamiento de los espacios interiores. Una edificación bien diseñada ubicará sus principales ventanas y aberturas sobre las fachadas norte y sur y protegerá las fachadas este y oeste contra la radiación directa manteniendo así un equilibrio entre el confort térmico y visual. La orientación de la edificación también es importante para el uso de la ventilación natural como estrategia de enfriamiento pasivo, ya que esta debe facilitar la ventilación cruzada a través de ventanas o aberturas considerando la dirección del viento predominante y de esta manera reducir la necesidad de sistemas de climatización. Otro aspecto importante en el que influye la orientación es en la captación de energía solar para su uso en sistemas fotovoltaicos que generen electricidad y sistemas de calentamiento solar de agua. En este caso los techos y superficies orientadas hacia el sur son ideales para la implementación de este tipo de sistemas permitiendo la integración de energías renovables y mejorando la eficiencia energética de la edificación.

2. **Forma.** La forma de la edificación se refiere a su configuración tridimensional y tiene en cuenta el volumen, sus proporciones y la relación entre las superficies exteriores. La forma incide en la IEQ y eficiencia energética de la edificación ya que ésta determina como se interactúa con el entorno incidiendo en las pérdidas o ganancias de calor, la iluminación y ventilación natural. La forma ideal de una edificación está altamente influenciada por el clima local como se muestra en la Fig. 17 y en este sentido, las formas más alargadas y abiertas son ideales para climas como el de Cali ya que permiten una mejor ventilación natural y reducción de la acumulación de calor mientras que para climas fríos son preferidas las formas más compactas, las cuales minimizan las superficies expuestas reduciendo las ganancias o pérdidas de calor. Además de las formas compactas y alargadas existen otras variantes en el diseño arquitectónico de las edificaciones como son las formas en “L” o en “U” que generan protección solar y mejoran la ventilación natural. Las formas en “L” pueden generar espacios exteriores protegidos como patios o terrazas sombreadas y favorecer la ventilación cruzada para el enfriamiento pasivo de la edificación. Las formas en “U” son ideales para incluir patios

interiores y encauzar el flujo de viento hacia una mayor superficie exterior y de esta manera ayudar a mejorar el confort térmico. Una métrica importante para considerar en la definición de la forma de una edificación es el Factor de Forma (FF) ya que permite entender cómo una edificación gana o pierde energía térmica en función de su forma. Un factor de forma bajo es generalmente más preferido en climas fríos mientras que un factor de forma alto con una envolvente bien diseñada puede ser más eficiente en climas cálidos. El FF se calcula como la relación entre la superficie de la envolvente y su volumen interior tal como se muestra en la ecuación 3.

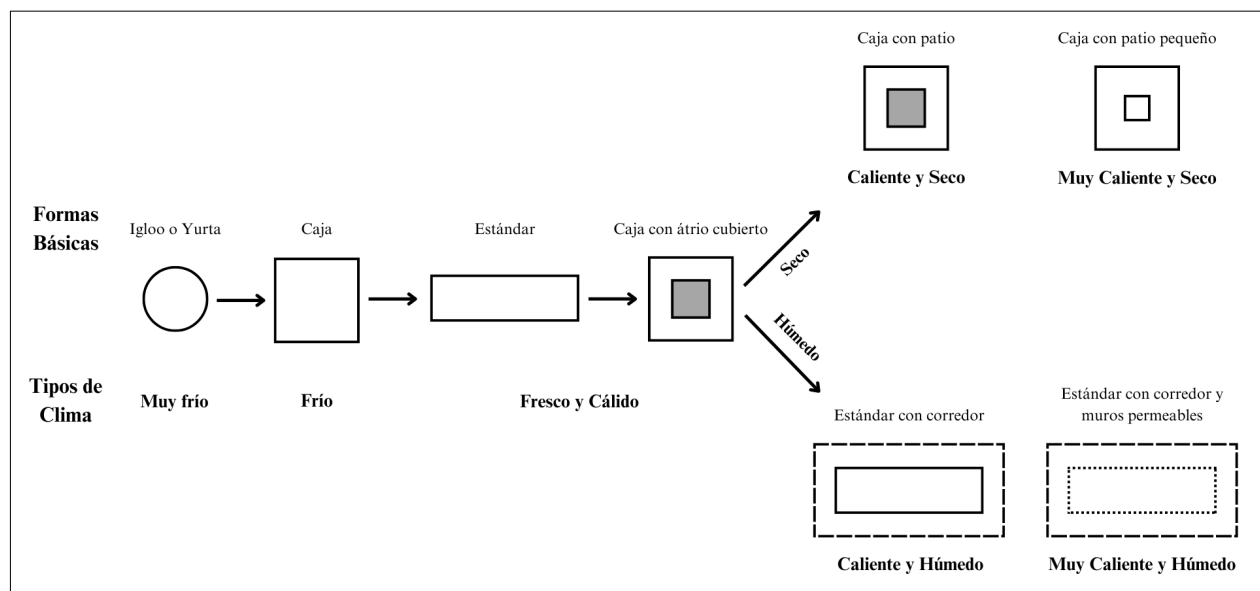


Fig. 17 Formas básicas de edificaciones según el clima local

$$\text{Factor de Forma} = \left(\frac{\text{Área de la envolvente}}{\text{Volumen de la edificación}} \right) \quad (3)$$

3. Microclima. El microclima es la variación de las condiciones atmosféricas en el entorno cercano a la edificación durante un período de tiempo. Este factor es relevante para la eficiencia energética y el confort térmico de la edificación, ya que puede tener incidencia directa en aspectos como la ventilación natural, la temperatura exterior, la radiación solar incidente sobre la envolvente y el deslumbramiento por reflexión.

- **Vegetación y paisajismo.** El microclima está determinado principalmente por el paisajismo y el tipo de vegetación exterior o al interior de la edificación y su uso estratégico

son una solución técnica y económicamente conveniente para reducir las ganancias de calor. El sombreado y el efecto del proceso de evapotranspiración¹¹ contribuyen a disminuir la temperatura del aire y el suelo lo cual favorece las condiciones ambientales. Sin embargo, en áreas de alta densidad urbana puede presentarse el fenómeno de isla de calor, donde el alto número de edificaciones y superficies como asfalto y concreto elevan la temperatura del microclima. En un clima como el de Cali, lo ideal es tener una alta densidad de árboles para generar sombra, pero con vegetación baja mínima para no bloquear el flujo del viento. Dentro de las técnicas más usadas de paisajismo y vegetación al interior se encuentran los techos y muros verdes, plantaciones en balcones o terrazas y los jardines colgantes (interiores y exteriores), especialmente en edificaciones altas o con espacios de gran altura [43]. Además, la vegetación que rodea la edificación no solo contribuye a reducir la temperatura del edificio, sino que también actúa como una barrera para el flujo de calor proveniente del exterior y en este sentido, variables como la textura, altura, ancho, longitud, forma, perfil, orientación y densidad de la vegetación, son importantes para maximizar estos beneficios. Los beneficios reportados en la literatura [40] sobre el efecto del paisajismo y la vegetación muestran un ahorro de energía de hasta un 29% y una reducción de la temperatura interior de la edificación de hasta 9°C. Otro factor que favorece el microclima son los cuerpos de agua cercanos a la edificación como son los ríos, lagos y mares, los cuales ayudan a disminuir la temperatura superficial de los alrededores y del aire exterior. Sin embargo, se debe tener precaución porque los cuerpos de agua pueden aumentar levemente la humedad contenida en el aire, o reflejar la radiación solar directa.

4. **Iluminación natural.** La iluminación natural se refiere al uso de la luz solar directa e indirecta a través de ventanas, tragaluces y otros elementos de diseño arquitectónico para iluminar los espacios interiores de una edificación. La iluminación natural debe considerarse en las etapas tempranas del diseño arquitectónico ya que tiene una alta incidencia en el confort visual, las ganancias de calor y el uso de iluminación artificial, contribuyendo no solo al bienestar de los ocupantes sino también a la eficiencia energética de la edificación. Las estrategias de iluminación natural dependen de la disponibilidad de luz natural, la cual está determinada por la latitud donde está ubicada la edificación, las condiciones climáticas (nubosidad y brillo

¹¹ Evapotranspiración es el efecto combinado de la evaporación del agua desde el suelo y la transpiración del agua a través de las plantas [33].

solar), y los elementos que rodean la edificación como la vegetación, edificaciones vecinas u otros obstáculos. Para Cali, donde los niveles de brillo solar son altos durante todo el año, las estrategias de diseño pasivo para iluminación natural deben enfocarse en evitar ganancias excesivas de calor restringiendo la entrada de la luz solar directa al interior de la edificación mediante aleros, “*brise-soleil*”¹² (cortasol) y persianas exteriores, pero permitiendo el uso de la luz indirecta reflejada desde el suelo o de otros elementos difusores. Sin embargo, en zonas donde la disponibilidad de luz solar sea limitada se debe priorizar la captación de luz mediante ventanas grandes orientadas al sur o norte. Además de las estrategias de diseño pasivo, existen sistemas de iluminación natural que optimizan la entrada de luz solar al interior de la edificación entre los que se encuentran los tragaluces, claraboyas y tubos solares que captan la luz exterior y la canalizan a través de tubos reflejantes hacia espacios interiores sin ventanas. Estos sistemas pueden integrarse con sistemas de control que modulan la cantidad de luz natural según las condiciones externas para optimizar el confort visual y reducir la necesidad de iluminación artificial. Para el diseño de la iluminación natural se deben tener en cuenta factores como la orientación y distribución de aberturas, la implementación de elementos de control solar, el uso de superficies reflectantes y el diseño de ventanas y tragaluces. Una vez diseñada la iluminación natural, esta puede evaluarse a través de simulaciones realizadas en DesignBuilder, las cuales permiten prever la distribución de la luz en los espacios a lo largo del día y el año, evaluar el control del deslumbramiento y calcular el Factor de Luz Día (DF, por sus siglas en inglés). El DF es una métrica que mide la cantidad de luz difusa que ingresa a un espacio sobre un plano de trabajo bajo un cielo estándar nublado y se define como la relación entre la iluminancia¹³ al interior sobre el plano de trabajo y la iluminancia exterior medida en un entorno sin sombra y mirando hacia arriba, tal como se muestra en la ecuación 4. Un DF entre el 2% y el 5% es óptimo para proveer una iluminación natural adecuada sin requerir iluminación artificial y sin provocar deslumbramiento. Las simulaciones de iluminación natural son cruciales en las etapas tempranas del diseño arquitectónico porque permiten evaluar la

¹² El brise-soleil es un dispositivo arquitectónico instalado en la fachada de la edificación para controlar la cantidad de luz solar directa que ingresa al interior y que está compuesto por lamas o paneles horizontales o verticales, móviles o fijos.

¹³ La iluminancia es la cantidad de luz que incide sobre una superficie medida en luxes y definida en lúmenes por unidad de área.

efectividad de las soluciones propuestas y el impacto que pueden tener sobre el consumo energético de la edificación.

$$DF(\%) = \left(\frac{E_i}{E_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

DF es el Factor de Luz Día (%)

E_i es la iluminancia en el interior de la edificación sobre el plano de trabajo (lux)

E_0 es la iluminancia en el exterior de la edificación bajo un cielo nublado (lux)

5. Control solar. El control solar es una estrategia fundamental en el diseño pasivo de edificaciones que tiene como objetivo proteger la edificación contra las ganancias de calor y aprovechar al máximo la iluminación natural regulando su intensidad, pero sin comprometer el confort visual de los ocupantes. Un control solar efectivo está determinado por el diseño de la envolvente (especialmente de sus aberturas), los materiales usados, y la trayectoria solar anual. El control solar usa técnicas y sistemas para bloquear, filtrar o redireccionar la radiación solar antes que ingrese al interior de la edificación y genere sobrecalentamiento de los espacios. Dentro de las técnicas más efectivas para climas como el de Cali están el uso de elementos de sombreado, el diseño de aberturas y la selección del tipo de vidrios.

- **Sombreado.** El sombreado es una de las técnicas pasivas que protege la edificación de las ganancias de calor solares, permite optimizar las horas de luz natural y ayuda a reducir el uso de iluminación artificial, siendo así fundamental en climas como el de Cali, para disminuir la carga de enfriamiento de los sistemas climatización y lograr edificaciones energéticamente más eficientes. El sombreado utiliza elementos fijos o móviles, horizontales o verticales o también combinados que están instalados en la fachada y que impiden que la radiación solar directa ingrese al interior de la edificación. Para el diseño de los elementos de sombreado se utiliza la trayectoria solar para calcular los ángulos solares críticos correspondientes a la altura y azimuth solar y de esta manera lograr un equilibrio en su forma y tamaño de tal manera que no sean tan grandes que bloqueen el ingreso de luz natural o tan pequeños que no ofrezcan suficiente protección cuando se requiera. Dentro de

los elementos de sombreado más usados están los aleros o voladizos, que en muchos casos funcionan como balcones, los “*brise-soleil*” o cortasoles, persianas exteriores y la vegetación que no solo genera sombra, sino que ayuda a reducir la temperatura del entorno cercano. Los dispositivos de sombreado también pueden ser operables o automatizados por medio de sensores de luz y temperatura que, en función de la trayectoria solar, el clima y la temperatura al interior de la edificación logran un control más preciso del confort térmico y visual. Los sistemas automatizados o dinámicos mejoran el control del deslumbramiento y reducen de manera más efectiva las ganancias de calor, además que son bien valorados en edificaciones que aspiran a certificaciones de sostenibilidad. Como complemento al sombreado exterior, están los elementos de sombreado interior, los cuales son operables y corresponden a persianas horizontales o verticales o cortinas que ofrecen un control adicional sobre el ingreso de luz natural y el confort térmico. La evaluación de diferentes técnicas de sombreado en diferentes climas y tipos de edificaciones reportados en la literatura [40] muestran un ahorro de energía de hasta un 32% y una reducción de la temperatura interior de la edificación de hasta 2°C.

- **Aberturas.** Esta técnica se refiere a las ventanas, puertas, tragaluces o cualquier otra perforación en la envolvente de la edificación que determinan la cantidad de radiación solar y viento que ingresa a un espacio y pueden ser fijas, operables o automatizadas. Su diseño, tamaño, distribución y orientación es relevante no solo desde el punto de vista estético del diseño arquitectónico, sino que tiene una alta incidencia en las ganancias de calor y la Calidad Ambiental Interior (IEQ). En Cali, las aberturas deben ubicarse de manera estratégica para maximizar la ventilación cruzada y la iluminación difusa evitando ganancias de calor que puedan aumentar la carga térmica de la edificación afectando el confort térmico y la eficiencia energética. En este sentido, las aberturas orientadas sobre los costados norte y sur son ideales para tener una captación de luz natural más controlada mientras que las aberturas sobre los costados este y oeste deberán estar protegidas con elementos de control solar para evitar la que la radiación directa ingrese a los espacios en las horas de la mañana y la tarde. Para un diseño óptimo de las aberturas, en especial las ventanas, es fundamental mantener un equilibrio entre ganancias de calor, iluminación natural y la eficiencia energética de la edificación por lo que es necesario considerar aspectos de su geometría como la forma, el tamaño y la proporción. Ventanas rectangulares

o alargadas posicionadas de forma horizontal son efectivas para distribuir la luz y ventilación natural de manera más uniforme mientras que ventanas verticales y altas pueden ser mejor aprovechadas para captar luz difusa desde diferentes ángulos. Otro aspecto fundamental para considerar en el diseño de las aberturas es la relación ventana-pared (WWR, por sus siglas en inglés), que mide el porcentaje del área de la pared que está ocupada por ventanas. Según el Manual de Construcción Sostenible de Cali [44], las ventanas rectangulares horizontales o con relación de aspecto 1:1 en conjunto con una WWR entre 30% y 40% son recomendadas para la mayoría de las tipologías de edificaciones en la ciudad.

- **Vidrios.** Los vidrios o acristalamiento en las ventanas y tragaluces son una barrera de control solar con alta incidencia en la IEQ y la eficiencia energética de la edificación y su selección adecuada permite reducir el uso de iluminación artificial y de sistemas mecánicos para satisfacer las necesidades de climatización. La cantidad de radiación solar que ingresa a la edificación a través de los vidrios depende de sus propiedades ópticas y térmicas, que para fines de control solar se definen como: reflectividad, transmitancia y absortividad. La reflectividad es la capacidad del vidrio para reflejar y evitar que la radiación solar incidente sobre su superficie ingrese a la edificación, la transmitancia es importante en aspectos como la iluminación natural ya que determina la capacidad de permitir el paso de radiación solar a través del vidrio y la absortividad es la capacidad del vidrio para absorber la radiación solar que incide sobre su superficie lo cual puede generar calor al interior de la edificación. Estas propiedades se reflejan en métricas que sirven para seleccionar el vidrio adecuado como son el coeficiente de transferencia de calor (U) que regula la cantidad de calor que se transfiere a través del vidrio debido a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la edificación y se expresa en W/m^2K ; el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC, por sus siglas en inglés) que mide la cantidad de radiación directa, difusa y reflejada que atraviesa el vidrio e ingresa al interior de la edificación y se mide entre 0 y 1; la transmitancia visible (Tv) la cual es el porcentaje de luz visible que atraviesa el vidrio y llega al interior de la edificación; y el coeficiente de sombra (SC, por sus siglas en inglés) que compara la ganancia de calor a través de un vidrio en comparación con la ganancia de calor a través de un vidrio estándar claro de 3 mm de espesor y también se mide entre 0 y 1. Los tipos de vidrio usados para control solar son vidrios de baja emisividad conocidos

como “Low-E”, vidrios con películas reflectantes y vidrios tintados los cuales pueden usarse de forma monolítica o configurarse en ensambles dobles o triples que incluyen cámaras de aire o gases inertes como el argón que permiten reducir considerablemente la transferencia de calor hacia el interior de la edificación. Típicamente estos vidrios y configuraciones tienen valores U entre 0.5 y 5.6 W/m²°K, un SGHC entre 0.3 y 0.5, una T_v entre el 20% y el 60% y un SC entre 0.3 y 0.5. La práctica profesional indica que las ganancias de calor a través de los vidrios en una edificación de aulas universitarias en Cali pueden reducirse entre un 28% usando un vidrio monolítico con película reflectante y un 47% si se usa una configuración de doble vidrio con cámara de aire [45].

- 6. Aislamiento térmico.** El aislamiento térmico es un material o conjunto de materiales que se utilizan para limitar la ganancia o pérdida de calor de las superficies que operan a temperaturas por encima o por debajo de la temperatura ambiente. En el contexto del diseño pasivo de edificaciones es usado como un elemento de protección de la envolvente para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico de sus ocupantes. Los materiales usados como aislamientos térmicos se pueden clasificar en cuatro tipos principalmente: fibroso, granular, celular y reflectivo, y para su selección se deben tener en consideración sus propiedades físicas tales como la temperatura de funcionamiento, la conductividad térmica, la resistencia a la compresión y la permeabilidad al vapor de agua [46]. Para evaluar el rendimiento o eficiencia de los materiales usados como aislamiento térmico se deben considerar dos aspectos fundamentales: la resistencia térmica (R) y el coeficiente global de transferencia de calor (U). La resistencia térmica describe la resistencia de un material o conjunto de materiales a la transferencia de calor y se calcula con base en la conductividad térmica del material y su espesor tal como se muestra en la ecuación 5; mientras que el coeficiente global de transferencia de calor mide el flujo de calor que atraviesa un material por unidad de superficie y temperatura y se relaciona con la resistencia térmica como se muestra en la ecuación 6. La relación inversa entre U y R es clave en el diseño de edificaciones que aspiren a tener un alto desempeño energético, ya que una alta resistencia térmica reduce significativamente el flujo de calor que puede transferirse a través de la envolvente lo que permite disminuir la carga térmica demandada para el uso de sistemas de climatización. Dentro de las técnicas más comunes de diseño pasivo de edificaciones se encuentran el aislamiento de superficies y el uso de materiales reflectantes.

- **Aislamiento de superficies.** Esta técnica se centra en la aplicación de materiales aislantes sobre las superficies exteriores e interiores de la envolvente de la edificación para reducir la transferencia de calor. En climas como el de Cali, es recomendado usar materiales aislantes fibrosos o celulares con altos valores de R, resistentes a la humedad y a las altas temperaturas como son las lanas de roca o mineral, el poliestireno expandido y el poliuretano.
- **Materiales reflectantes.** El uso de materiales reflectantes como las barreras radiantes, son una técnica extremadamente útil para reflejar hasta en un 97% la radiación solar incidente y están compuestas de materiales como láminas (o película) de aluminio u otros recubrimientos reflectantes que se instalan o aplican en techos o paredes. Los materiales reflectantes tienen alta reflectividad y baja emisividad lo que les permite reflejar gran parte de la radiación solar incidente y emitir poca radiación térmica hacia el interior de la edificación convirtiéndolos en elementos fundamentales para el control de ganancias solares y mejorar el confort térmico. Las barreras radiantes pueden usarse en conjunto con el aislamiento de superficies para mejorar el desempeño energético de las edificaciones y así reducir el consumo de energía y emisiones de CO_{2e}.

$$R = \left(\frac{d}{\lambda} \right) \quad (5)$$

Donde:

R es la resistencia térmica del material (m²·K/W)

d es el espesor del material (m)

λ es la conductividad térmica del material (W/m·K)

$$U = \left(\frac{1}{R_{total}} \right) \quad (6)$$

Donde:

U es el coeficiente global de transferencia de calor del material (W/m²·K)

R_{total} es la resistencia térmica total del material o materiales ($m^2 \cdot K/W$)

- 7. Techos verdes.** Los techos verdes son sistemas constructivos que ayudan a modular el calor en la edificación y están compuestos por diferentes capas de materiales que proporcionan condiciones para el crecimiento de vegetación en un techo convirtiéndose en una estrategia de diseño pasivo que permite reducir la carga de enfriamiento de las edificaciones, el efecto de isla de calor en las ciudades, la escorrentía de aguas pluviales, la transmisión de ruido y los contaminantes del aire que normalmente se acumulan en los techos. Las capas de un techo verde desde el exterior hacia el interior incluyen la capa de vegetación, el medio de cultivo, el medio filtrante, el drenaje para la retención de humedad, barreras para el control de raíces y las membranas impermeabilizantes en la parte superior de la cubierta estructural. Dependiendo del tipo de construcción y el mantenimiento requerido, los techos verdes se dividen en tres categorías: techos extensivos, intensivos y semi-intensivos. Los techos extensivos tienen una capa delgada de medio de cultivo de alrededor de 6 a 20 cm de espesor, generalmente cultiva musgo, sedums y hierbas que requieren menos mantenimiento. El techo verde intensivo requiere un sustrato de mayor profundidad que va desde los 20 a 100 cm y permite cultivar una mayor variedad de plantas, pero conlleva un mayor riego y mantenimiento. Los semi-intensivos combinan características de ambos tipos de techos, sin embargo, el sustrato extensivo no debe exceder el 25% del área total del techo [43]. Uno de los efectos más relevantes que contribuyen al enfriamiento de las edificaciones con techos verdes es el de evapotranspiración sin embargo su efectividad depende del tipo de techo, el medio de cultivo y las condiciones ambientales. En climas como el de Cali, los techos verdes no solo ayudan a reducir la temperatura al interior de la edificación actuando como una barrera natural frente a la radiación solar, sino que también mejoran el microclima de los alrededores y el confort térmico, pueden usarse en conjunto con otras estrategias pasivas como la ventilación natural y contribuyen al aumento de la biodiversidad del sitio.
- 8. Difusividad térmica.** La difusividad térmica es una propiedad que describe cómo un material responde a las fluctuaciones de temperatura combinando su capacidad para conducir calor, almacenarlo y liberarlo en función de su densidad y capacidad calorífica. Aunque en literatura arquitectónica el término “masa térmica” es ampliamente utilizado, este hace referencia a la capacidad de los materiales de una edificación para almacenar y liberar calor, concepto que en

términos técnicos está directamente relacionado con la difusividad térmica. Materiales como el concreto, el ladrillo y la piedra, con alta capacidad calorífica y densidad, poseen baja difusividad térmica lo que significa que pueden absorber calor durante el día, retardar su transferencia hacia el interior y liberarlo gradualmente por la noche, lo que permite regular las fluctuaciones de temperatura. En climas cálidos como el de Cali, el uso de materiales con baja difusividad térmica puede reducir significativamente las necesidades de enfriamiento mecánico y mejorar el confort térmico interior. Su efectividad depende de una integración adecuada con estrategias de diseño pasivo como la orientación óptima de la edificación, la ventilación natural nocturna y técnicas complementarias como el aislamiento térmico y el sombreado.

9. Materiales de cambio de fase. Los materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés), también conocidos como materiales de almacenamiento de calor latente, son sustancias que almacenan y liberan energía en forma de calor durante un proceso de cambio de fase de sólido a líquido y viceversa a una temperatura casi constante y que permiten aumentar la masa térmica de la estructura de la edificación. Los PCM se clasifican en materiales orgánicos como las parafinas y ácidos grasos, inorgánicos como los hidratos de sal y mezclas eutécticas. Los PCM pueden almacenar tres veces más calor que el agua y nueve veces más que el concreto [33] y como permanecen en estado líquido parte de su ciclo deben estar encapsulados lo que facilita que puedan estar embebidos en los muros y techos de la edificación, además de la posibilidad de ser usados en cielos falsos y ventanas. Los PCM se deben seleccionar dependiendo su punto de fusión con rangos que van desde los -5°C hasta los 190°C, sin embargo, en el contexto del diseño pasivo de edificaciones es crucial que los PCM se seleccionen para que su punto de fusión esté en el rango de la zona de confort térmico que, para el caso de Cali, podría estar entre los 24°C y 28°C. Los PCM son útiles para reducir la carga de enfriamiento y mejorar la eficiencia energética y la masa térmica de la edificación, y su efectividad se puede maximizar cuando se usa en conjunto con otras estrategias como la ventilación natural y técnicas de aislamiento térmico.

10. Ventilación natural. La ventilación natural es conocida como una de las estrategias más efectivas y usadas en el diseño pasivo de edificaciones y está destinada a proveer el aire exterior necesario para lograr niveles de Calidad del Aire Interior (IAQ) aceptables y proporcionar enfriamiento cuando sea necesario contribuyendo de esta manera a mejorar el confort térmico y la eficiencia energética de la edificación. ASHRAE [47], define la ventilación como la

provisión de aire exterior a un espacio para diluir contaminantes y extraer calor mientras que el término natural hace referencia a la fuerza motriz que causa el movimiento del aire en comparación con un medio mecánico. La efectividad de la ventilación natural depende de aspectos relacionados con el microclima como la velocidad del viento, temperatura, humedad, topografía del terreno y la calidad del aire exterior, además de los relacionados con el diseño arquitectónico de la edificación como la orientación, la forma, la ubicación y tamaño de aberturas y la distribución de espacios al interior. Las técnicas de ventilación natural se pueden agrupar en dos categorías, las que dependen de la presión del viento sobre la fachada, como la ventilación de un solo lado “*single-sided*” y la ventilación cruzada “*cross ventilation*” y las que se basan en el efecto de flotabilidad al interior de la edificación, como la chimenea solar.

- **Ventilación por presión del viento.** Esta técnica de ventilación es posible gracias al gradiente de presión generado por la corriente de viento al golpear una fachada de la edificación creando una zona de alta presión en la cara expuesta mientras que en la fachada opuesta se genera una zona de baja presión impulsando el aire hacia el espacio interior. La ventilación de un solo lado ocurre cuando las aberturas están en la misma fachada lo que limita la salida del aire y el alcance dentro del espacio. Existe ventilación de un solo lado con una o con dos aberturas en la fachada donde la distancia o alcance del aire puede extenderse hasta dos veces la altura del espacio ventilado (2H) mientras que para la configuración de dos aberturas es hasta 2.5 veces la altura (2.5H). La ventilación cruzada por su parte depende de aberturas en dos lados opuestos del espacio ventilado y la distancia o alcance del aire es puede ser hasta cinco veces la altura del espacio (5H) [48]. Se estima que, en un buen diseño, el tamaño de la abertura para la ventilación de un solo lado está entre el 5% y el 10% del área ventilada y para el caso de la ventilación cruzada el tamaño de las aberturas es alrededor del 1% para cada lado. Estudios sobre el efecto de la ventilación por presión del viento reportados en la literatura para climas similares al de Cali [40] muestran ahorros de energía hasta un 20% y una reducción de la temperatura interior de la edificación desde 2°C hasta 12°C. El flujo de aire a través de una abertura está determinado por la ecuación 7.

$$Q = C_v \times V \times A \quad (7)$$

Donde:

Q es el flujo de aire a través de una abertura (m^3/s)

C_v es el coeficiente de flujo a través de las aberturas (típicamente 0.6 para vientos perpendiculares y 0.3 para vientos a 45°)

V es la velocidad del aire en la abertura (m/s)

A es el área de la abertura (m^2)

- **Ventilación por flotabilidad.** Esta técnica se basa en la diferencia de presión generada por la variación de temperatura y humedad entre el aire interior y exterior, generando un movimiento de aire al interior de la edificación donde el aire caliente asciende y el aire fresco desciende. Este movimiento natural permite la entrada de aire fresco desde el exterior y la salida del aire caliente desde el interior generando un enfriamiento pasivo de la edificación. La cantidad de calor removido del espacio es proporcional a la diferencia de altura entre las aberturas, es decir, entre mayor sea esta diferencia permitirá que una mayor cantidad de aire ingrese al área ventilada. Otro aspecto que favorece la cantidad de flujo de aire que ingresa a la edificación es la relación entre el tamaño de las aberturas, entre mayor sea la abertura de salida con respecto a la de entrada mayor será el flujo de aire circulando. Un factor importante en la efectividad del movimiento de aire dentro de la edificación y el diseño de las aberturas de entrada y salida de aire es la ubicación del plano neutro (NPL, por sus siglas en inglés), el cual representa el punto en la edificación donde la presión del aire interior es igual a la presión del aire exterior y que divide las zonas de entrada y salida del aire. Un NPL muy alto puede limitar la entrada de aire fresco a la edificación mientras que si se encuentra muy bajo puede reducir la salida de aire caliente. Una aplicación de la ventilación por flotabilidad es la chimenea solar la cual utiliza la energía solar para incrementar la efectividad de la ventilación natural. La chimenea solar consiste en un conducto vertical o inclinado que generalmente está construido con materiales que absorben calor para calentar el aire al interior de la chimenea generando un flujo natural de aire ascendente que se expulsa fuera de la edificación. Cuando el conducto de la chimenea solar no está expuesto directamente a la radiación solar es posible aprovechar el efecto invernadero creado por un cubículo construido con materiales absorbentes y oscuros en el

techo de la edificación para generar el flujo de aire ascendente. Resultados de análisis de varias configuraciones de ventilación por chimenea solar reportados en la literatura para climas como el de Cali [40] muestran ahorros de energía del 12% hasta el 30% y una reducción de la temperatura interior de la edificación desde 2°C hasta 14°C. El cálculo del flujo de aire para la ventilación por flotabilidad esta dado por la ecuación 8.

$$Q = C_D \times A \times \sqrt{\frac{2 \times g \times \Delta H_{NPL} \times (T_i - T_0)}{T_i}} \quad (8)$$

Donde:

Q es el flujo de aire (m³/s)

C_D es el coeficiente de descarga para la abertura (típicamente para flujo unidireccional 0.65 y para flujo bidireccional $[0.40 + 0.0045 \times (T_i - T_0)]$)

A es el área libre de la abertura más pequeña (m²)

g es la constante gravitacional (9.81 m/s²)

ΔH_{NPL} es la altura desde el punto medio de la abertura inferior hasta el plano neutro

T_i es la temperatura absoluta interior (K)

T_0 es la temperatura absoluta exterior (K)

Cuando $T_0 > T_i$ los subíndices de temperatura deberán ser invertidos en la ecuación.

- **Muro Trombe.** Un muro Trombe es un elemento arquitectónico que combina principios de transferencia de calor y ventilación natural para regular la temperatura interior de una edificación y se clasifica en muros para enfriamiento o calefacción. Este sistema consiste en un muro construido con materiales de alta densidad y capacidad térmica, como concreto, ladrillo o piedra, orientado generalmente hacia el sol y cubierto con un vidrio o material transparente, dejando una cámara de aire entre el muro y el vidrio. Aunque el uso del muro Trombe es más común para calefacción en climas fríos, en climas como el de Cali puede adaptarse para enfriamiento o ventilación aprovechando las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior de la edificación para generar un flujo de aire por convección natural. La eficiencia del muro Trombe para enfriamiento depende de factores como el tipo

y las propiedades de los vidrios, la incorporación de elementos de sombreado para limitar las ganancias solares directas, las propiedades de difusividad térmica del muro, los materiales de construcción, la intensidad de la radiación solar y la orientación. Además, el diseño de las aberturas de entrada y salida de aire junto con el tamaño de la cámara de aire juegan un papel relevante en la generación de un flujo de aire constante que enfríe el espacio interior. Existen tres variantes principales del muro Trombe adaptadas para enfriamiento [40]:

- Muro clásico: Utiliza únicamente principios de convección natural para generar ventilación y disipar calor.
- Muro híbrido: Combina ventilación natural con el uso de sistemas mecánicos para mejorar el flujo de aire en condiciones de baja circulación natural o incluye materiales cerámicos porosos llenos de agua que funcionan bajo el principio de enfriamiento evaporativo.
- Muro fotovoltaico: Integra paneles solares en la estructura del muro para generar energía mientras contribuye a la ventilación y enfriamiento pasivo.

En climas como el de Cali, un muro Trombe diseñado adecuadamente puede ser una estrategia efectiva para mejorar el confort térmico y reducir la carga térmica de las edificaciones especialmente cuando se combina con otras estrategias pasivas como la ventilación cruzada y el sombreado.

11. Enfriamiento evaporativo. El enfriamiento evaporativo es una estrategia de disipación de calor psicrométrica que aprovecha el principio de evaporación adiabática¹⁴ del agua para absorber calor del aire y disminuir su temperatura, minimizando de esta manera la cantidad de energía requerida para enfriar la edificación. Existen dos tipos de enfriamiento evaporativo, directo e indirecto y la eficiencia de cualquiera de estos métodos depende directamente de diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en la corriente de aire de suministro [6].

- **Enfriamiento evaporativo directo.** En el enfriamiento evaporativo directo, el calor sensible del aire se utiliza para elevar el calor latente del agua, lo que resulta en la evaporación del agua directamente en la corriente de aire reduciendo la temperatura bulbo

¹⁴ Adiabático se refiere al proceso en el cual no hay transferencia de calor entre un sistema y su entorno.

seco del aire y elevando su nivel de humedad. Los equipos de evaporación directa enfrían el aire por contacto directo con el agua, ya sea por un material de superficie extendida húmeda o con aspersores. Los ahorros de energía relacionados con el uso de sistemas de enfriamiento evaporativo directo en comparación con el uso de sistemas de climatización tradicionales están entre el 20% y 40% [49].

- **Enfriamiento evaporativo indirecto.** En el enfriamiento evaporativo indirecto, una corriente de aire secundario (aire exterior) es usada para eliminar el calor de la corriente de aire primario (aire interior) usando un intercambiador de calor. En este proceso, el aire exterior pasa inicialmente a través de una superficie húmeda donde el agua se evapora y reduce la temperatura de bulbo seco del aire. Luego, la corriente de aire que ha sido enfriada se canaliza hacia el intercambiador de calor donde transfiere su energía térmica al aire interior sin entrar en contacto directo con este y ni elevar su humedad. El enfriamiento evaporativo indirecto puede usarse como estrategia para mejorar la eficiencia energética de la edificación al usarlo en conjunto con sistemas de climatización tradicionales como una primera etapa de enfriamiento del aire exterior. Los ahorros de energía relacionados con el uso de sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto en comparación con el uso de sistemas de climatización tradicionales están entre el 60% y 75% [49].

Con base en las Fig. 8 y Fig. 9, para Cali el enfriamiento evaporativo directo es más efectivo entre las 10 AM y las 4 PM, cuando la temperatura de bulbo seco es alta y la humedad relativa es más baja, mientras que el indirecto es más propicio durante la noche y las primeras horas del día cuando la humedad relativa es más alta. La efectividad de esta estrategia puede maximizarse si se usa en conjunto con otras estrategias de diseño pasivo como la ventilación natural y el control solar.

12. Enfriamiento por radiación. El enfriamiento por radiación es una estrategia de diseño pasivo que aprovecha la capacidad de algunos materiales y superficies con alta emisividad (>0.9) y reflectividad ($>95\%$) para disipar calor mediante la emisión de radiación infrarroja hacia el cielo. Las principales técnicas de enfriamiento por radiación son el enfriamiento radiativo nocturno y enfriamiento radiante.

- **Enfriamiento radiativo nocturno.** Esta técnica se puede lograr ya sea por radiación directa o radiación indirecta. En la técnica de radiación directa, el techo está diseñado como un disipador de calor hacia un cielo fresco y despejado, mientras que en la radiación indirecta

la masa de la estructura de la edificación almacena calor durante el día y lo libera durante la noche hacia una superficie emisora que luego irradia el calor hacia el cielo. En climas similares al de Cali, se pueden lograr ahorros de energía hasta de un 11% usando sistemas de enfriamiento radiativos nocturnos [50].

- **Enfriamiento radiante.** Esta técnica usa dos mecanismos de transferencia de calor para proveer enfriamiento al interior de una edificación, uno por radiación que puede absorber hasta un 55% de la carga de enfriamiento y el otro por convección que cubre el porcentaje restante. El enfriamiento radiante utiliza superficies frías como techos o pisos radiantes que cuentan con tuberías embebidas por las que fluye agua para absorber el calor del espacio interior mediante radiación y su capacidad típica está entre los 34.7 W/m² y 39.4 W/m² [49]. El método de enfriamiento de las superficies puede ser activo o pasivo dependiendo si el agua que pasa al interior de los tubos es enfriada por sistemas de refrigeración mecánicos o proviene de fuentes naturales. Los sistemas de enfriamiento radiante ofrecen una distribución de temperatura más uniforme, menor movimiento de aire y una reducción en las molestias relacionadas con el confort térmico de los ocupantes de una edificación en comparación con los sistemas de climatización convencionales. En climas como el de Cali, la combinación de sistemas de enfriamiento radiante con ventilación natural en aplicaciones de uso comercial puede lograr ahorros de energía significativos y mejoras en la Calidad del Aire Interior (IAQ) gracias al incremento de la eficiencia de enfriamiento, pasando de una razón de área típica de 20 m²/TR¹⁵ en sistemas convencionales de climatización a 116 m²/TR [45] en sistemas híbridos.

Como se pudo observar, la elección de las estrategias y técnicas aplicables a un proyecto depende no solo del diseño arquitectónico sino de la interacción que tenga la edificación con su entorno, en especial lo relacionado con el clima el cual define en gran medida si una edificación requiere enfriamiento, calefacción o las dos. ASHRAE [6] afirma que con las proyecciones sobre el cambio climático el nivel de calefacción tenderá a disminuir mientras que el de enfriamiento aumentará y algunas áreas se volverán más húmedas mientras que otras se volverán más secas. Analizando esto en términos de sostenibilidad, el confort térmico y los costos de funcionamiento de una edificación se vuelven un asunto relevante a considerar por los profesionales especializados

¹⁵ Tonelada de Refrigeración.

en el campo del diseño pasivo y la arquitectura bioclimática¹⁶. Para ayudar en estos campos se dispone de la carta psicrométrica de Givoni, una herramienta ampliamente usada para analizar las diferentes estrategias que pueden ser aplicadas a una edificación en función de las condiciones climáticas de su entorno. La carta psicrométrica de Givoni utiliza datos horarios anuales de temperatura y humedad relativa más el concepto de confort térmico para diagramar zonas de confort dentro de una carta psicrométrica tradicional.

En la Fig. 18 se muestra la carta psicrométrica de Givoni para la ciudad de Cali generada en el software Climate Consultant 6.0 [51] a partir de los datos climáticos anuales de la estación meteorológica de la Sede Meléndez de Univalle. Climate Consultant 6.0 es un software gratuito desarrollado por el Laboratorio de Investigación de Edificios de la Universidad de California (UCLA) para analizar datos climáticos en formato “epw” (*“Energy Plus Weather”*) y representarlos gráficamente para su fácil entendimiento. En esta imagen se pueden ver 15 estrategias que combinan diseño pasivo de edificaciones, procesos termodinámicos y sistemas mecánicos para lograr estar el 100% de las horas en la franja azul de confort térmico. Cabe destacar que, integrar técnicas de control solar de la edificación y ventilación natural desde el proceso de diseño arquitectónico resulta fundamental en el objetivo de disminuir la carga térmica del espacio y por ende el uso de sistemas convencionales de climatización.

¹⁶ La arquitectura bioclimática es un enfoque de diseño arquitectónico sostenible que incluye el diseño pasivo y aprovecha los recursos naturales del entorno para minimizar el impacto ambiental.

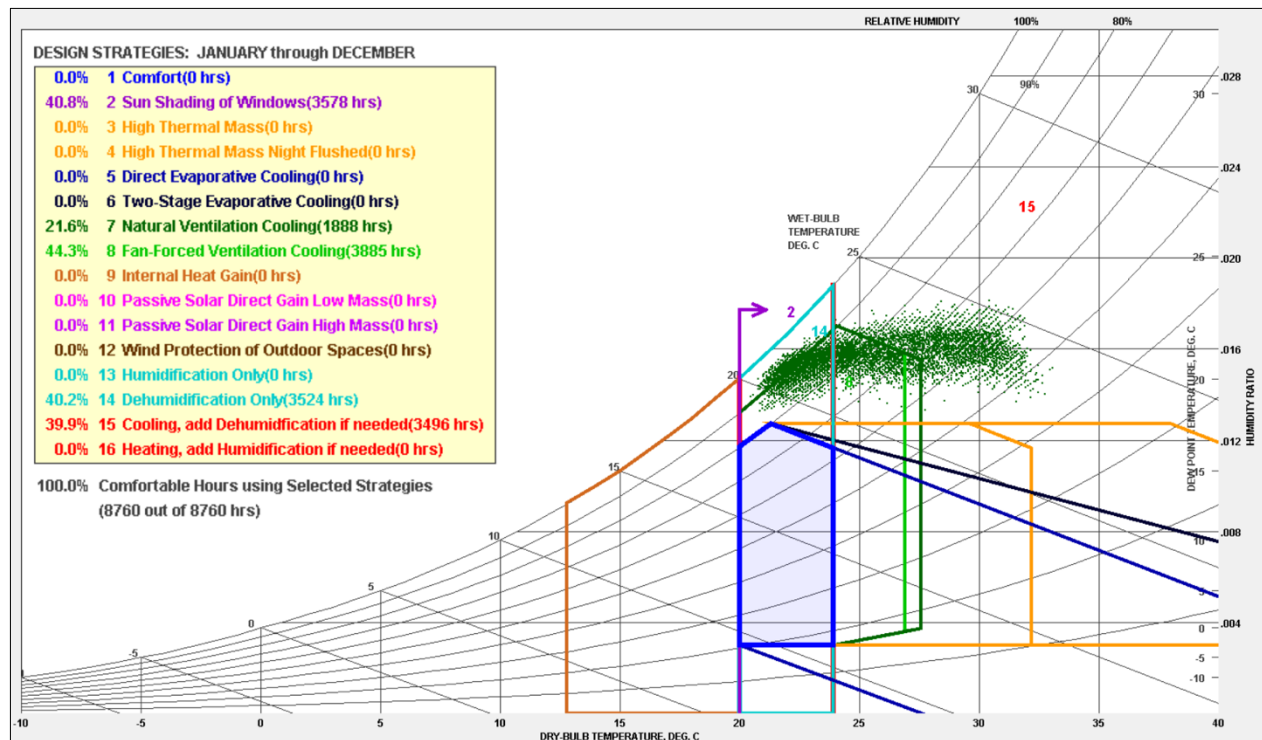


Fig. 18 Carta psicrométrica de Givoni para Cali

Nota: Imagen generada en Climate Consultant 6.0 [51] a partir de los datos climáticos de la estación meteorológica de Univalle.

5) Edificaciones Cero Energía (ECE)

a) Definición

Las Edificaciones Cero Energía (ECE) contribuyen a reducir las emisiones de CO_{2e} y generan ahorros a largo plazo en términos de operación y mantenimiento de las edificaciones. El concepto de ECE tiene en cuenta que es una edificación que está conectado a la red, que tiene un alto desempeño energético gracias a la implementación de Medidas de Eficiencia Energética (MEE) para reducir el uso de energía y que produce suficiente energía renovable en sitio para igualar o superar sus necesidades energéticas anuales. Existen definiciones para Edificaciones Cero Energía en Sitio, Cero Energía en Fuente, Cero Costo de Energía y Cero Emisiones por Energía; sin embargo, la definición de ECE depende de la frontera de análisis y la métrica a usar [52].

Una Edificación Cero Energía en Sitio es aquella que produce al menos tanta energía como la que se consume y se mide en el sitio. Esto significa que la energía renovable se genera en el sitio de construcción y se compara directamente con las necesidades de energía de la edificación. Una Edificación Cero Energía en Fuente produce tanta energía como la que debería haber generado en

la fuente para satisfacer la demanda de energía de la edificación, es decir, balanceada. La fuente de energía se refiere a la energía primaria utilizada tanto para generar como para entregar la energía a la edificación. En una Edificación Cero Costo de Energía, la cantidad de dinero que la empresa de servicios públicos paga al propietario de la edificación por la energía que esta exporta (suplida) a la red debe ser igual a la cantidad que el propietario de la edificación paga a la empresa de servicios públicos por la energía utilizada de la red. Una Edificación Cero Emisiones por Energía produce al menos tanta energía renovable libre de emisiones como la que utiliza de fuentes de energía que sí producen emisiones. La edificación compensa todas las emisiones de CO_{2e} producidas a partir de la energía que utiliza mediante la producción de energía renovable y compensaciones de carbono [53].

b) Flujos de energía a través de la frontera de análisis

La frontera de análisis representa un límite significativo que es funcionalmente parte de las edificaciones a través del cual se conocen o se pueden calcular las características de los flujos de energía [54]. Para una edificación, la frontera de análisis suele ser el límite de la propiedad y debe incluir el punto de interfaz de los servicios públicos [55]. La Fig. 19 muestra la frontera de análisis de los flujos de energía para una Edificación Cero Energía en Sitio y cómo estos se forman a partir de las necesidades de la edificación, la producción de energía renovable en sitio y la energía suministrada y exportada hacia y desde la edificación. Esta ilustración y concepto es concomitante con las definiciones de “Sistema de Control” o “Volumen de Control” típicamente usadas para delimitar “el sistema” y su “entorno” en el estudio de la energía y las sustancias puras llamado la Termodinámica.

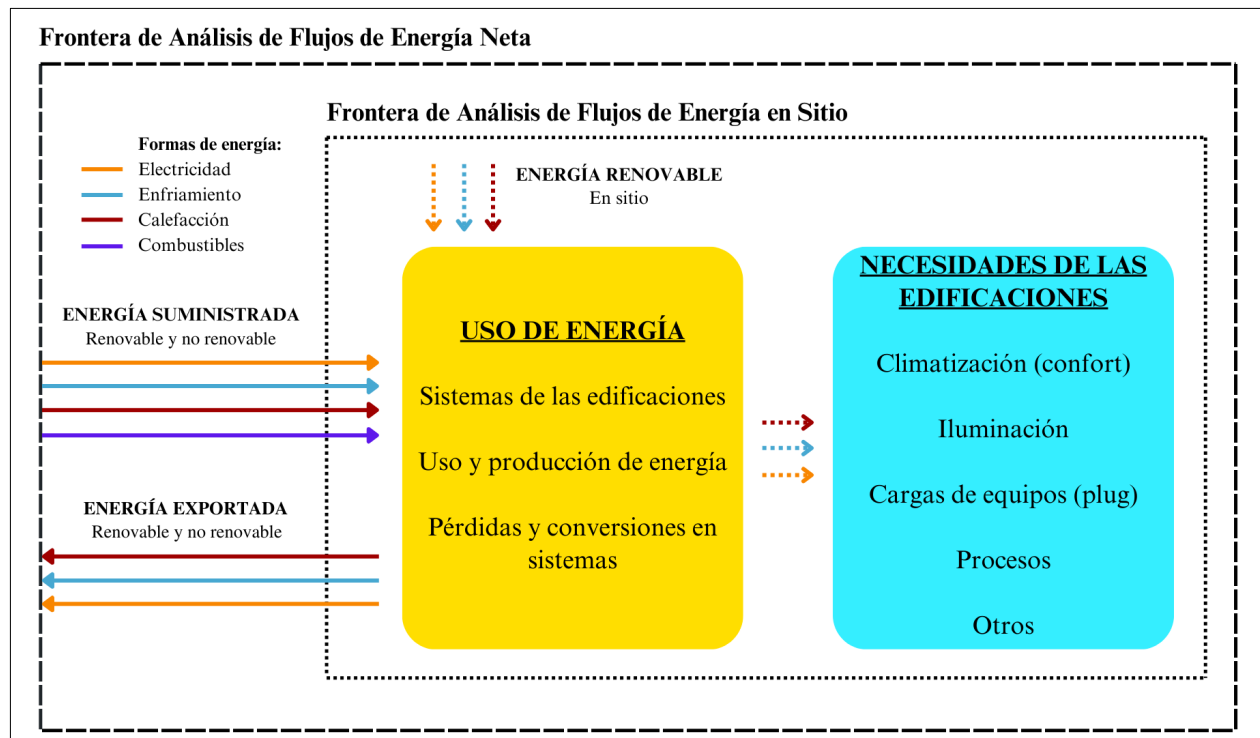


Fig. 19 Frontera de análisis de flujos de energía para el balance de una Edificación Cero Energía en Sitio

Nota: 1) Las líneas punteadas a color representan la energía transferida dentro de la frontera de análisis. 2) Las líneas solidas a color representan la energía transferida hacia o desde la frontera de análisis usada para el balance de Cero Energía.

c) Proceso de diseño para Edificaciones Cero Energía

Como ya se ha mencionado las Edificaciones Cero Energía (ECE) son aquellas que tienen altos niveles de eficiencia energética y generan energía renovable en sitio sin perder el enfoque de ofrecer también una buena Calidad Ambiental Interior (IEQ). Lo anterior solo se logra si desde las etapas de diseño de la edificación existe una adecuada planeación y definición de objetivos. Dentro de los objetivos para lograr una ECE están:

1. **Llevar a cabo un proceso colaborativo e iterativo de diseño.** Todos los involucrados deben tener el mismo y único objetivo que es lograr ECE sin comprometer las necesidades de IEQ. Las decisiones de diseño de todas las disciplinas técnicas deben ser analizadas en conjunto con todo el equipo de diseño y deben girar principalmente en torno a la energía, ya que estas decisiones afectan todas las etapas del ciclo de vida de la edificación.

2. **Desarrollar un plan para el uso de la edificación.** Definir cómo se va a usar la edificación sin embargo, no debe limitarse para simplemente lograr ser ECE. Además se debe contemplar la posibilidad de ampliar el uso de fuentes de energía renovable.
3. **Definir los requisitos del propietario del proyecto.** Se deben establecer las expectativas básicas de operación, el propósito del proyecto, los objetivos fundamentales y los criterios de desempeño energético de la edificación.
4. **Motivar a los interesados.** Los interesados en el proyecto deben conocer e involucrarse en la planeación, diseño, construcción, uso y operación de la edificación.

Con base en estos objetivos, la secuencia general que sigue el diseño de un ECE se muestra en la Fig. 20 donde se aprecian fundamentalmente cuatro actividades agrupadas en dos fases. Como resultado de la fase 1 se espera que se tengan las pautas de construcción sostenible de la edificación, la selección de sistemas mecánicos y eléctricos eficientes, un plan de operación y mantenimiento enfocado en mantener un alto desempeño energético y de IEQ, y que los usuarios conozcan los lineamientos para un correcto uso y funcionamiento de la edificación. La fase 2 contempla las energías renovables a implementar para suplir las necesidades de energía en sitio.

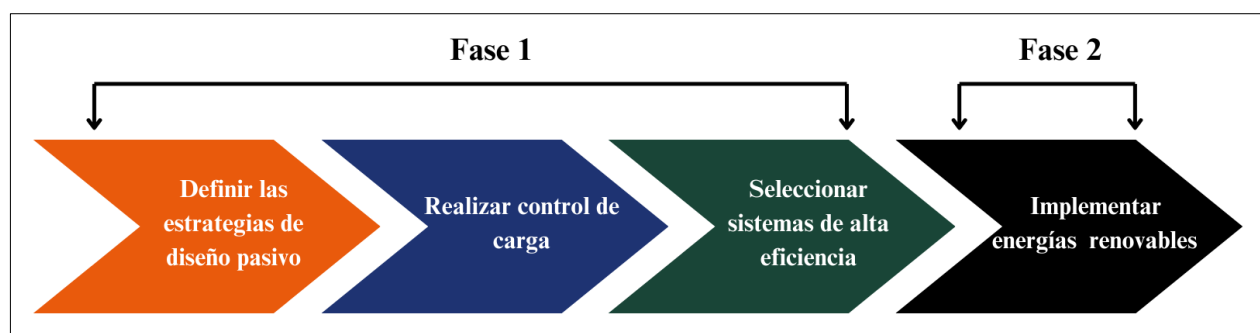


Fig. 20 Secuencia de diseño para Edificación Cero Energía

d) Evaluación de Edificaciones Cero Energía

Una forma de evaluar las Edificaciones Cero Energía (ECE) es usando como referencia el concepto de energía en la fuente. La energía en la fuente permite tener una visión más completa de la energía neta usada por una edificación incluyendo todas las etapas de la cadena de suministro energético. La energía en la fuente incluye la energía en sitio más la energía consumida o perdida

en las etapas de extracción, procesamiento y transporte de energía primaria (carbón, petróleo, gas natural, biomasa, otros); la conversión a electricidad; y la transmisión y distribución al sitio.

La energía en la fuente se calcula a partir de la energía suministrada y exportada para cada tipo de energía utilizando factores de conversión específicos. Estos factores son aplicados para convertir la energía suministrada y exportada en sitio en la energía en la fuente neta. En el caso de la energía generada en el sitio, cuando se exporta a la red como energía eléctrica, esta desplaza la energía eléctrica que se necesitaría de la red. Por lo tanto en el balance de ECE, a la energía exportada se le da el mismo factor de conversión de energía en la fuente que la energía suministrada con el fin de reconocer su efecto en el desplazamiento de la energía eléctrica suministrada.

En Colombia, según el Plan de Acción Indicativo PROURE: Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía [56], la eficiencia energética es del 31%. Lo anterior significa que por cada unidad de energía eléctrica suministrada en sitio son necesarias 3.22 unidades de energía en la fuente. En otras palabras, la disposición de 1 kWh de energía eléctrica en sitio requiere de 3.22 kWh en la fuente.

Con base en lo anterior y la Fig. 19, la energía neta puede calcularse a partir de la energía suministrada y exportada para cada tipo de energía utilizando factores de conversión de energía primaria en la fuente según la ecuación 9 [54]:

$$E_{neta} = \sum(E_{sum} \times FE_{fuente}) - \sum[(E_{exp} \times FE_{exp}) + (ER_{sum} \times FE_{ren-sum} \times FD_{ren-sum})] \quad (9)$$

Donde:

E_{neta} es la energía primaria en la fuente en kWh

E_{sum} es la energía suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio en kWh

FE_{sum} es el factor de energía primaria en la fuente, para Colombia es 3.22

E_{exp} es la energía exportada cruzando la frontera de análisis del sitio en kWh

FE_{exp} es el factor de energía primaria en la fuente de la energía exportada cruzando la frontera de análisis del sitio, para Colombia 3.22

ER_{sum} es la energía renovable certificada suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio en kWh

$FE_{ren-sum}$ es el factor de energía primaria en la fuente de la energía renovable certificada suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio

$FD_{ren-sum}$ es el factor de descuento para la energía renovable certificada suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio, para sistemas funcionando antes de 2022 entre 0.8 y 0.85 y para sistemas funcionando después de 2022, 0.95

6) Edificaciones Neto Cero (ENC)

a) Definición

Las Edificaciones Neto Cero (ENC) son esenciales para reducir las emisiones globales de CO_{2e}, hacer frente a la problemática del cambio climático y lograr objetivos de sostenibilidad a largo plazo en el sector de la construcción. Una ENC es una edificación diseñada y construida para maximizar su eficiencia energética y satisfacer su demanda anual de energía en operación exclusivamente mediante fuentes de energía renovables libres de carbono, ya sea generadas en el sitio o adquiridas externamente. Además, las ENC consideran el impacto del carbono embebido a lo largo de su ciclo de vida, incluyendo las emisiones asociadas a la extracción, fabricación y transporte de materiales, así como su uso, mantenimiento y eventual disposición. En este contexto, las ENC buscan alcanzar un balance neto cero de emisiones, logrando que las emisiones de CO_{2e} en operación y embebidas sean compensadas mediante la integración de estrategias sostenibles y tecnologías de mitigación como las energías renovables y la eficiencia en el uso de recursos energéticos [57].

Con base en lo anterior, es importante establecer dos enfoques al momento de establecer un marco de referencia para ENC. El primer enfoque está relacionado con las emisiones de CO_{2e} asociadas al uso de la energía para la operación de las edificaciones (etapas B6 y B7) de la Fig. 3 y que en adelante se denominará Edificaciones Neto Cero – Operacional (ENC-O). En 2024, la Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés), definió que una edificación que alcance cero emisiones operativas por el uso de energía debe haber cumplido como mínimo con los siguientes criterios [58]:

1. Eficiente energéticamente. La edificación debe estar entre las más eficientes energéticamente.

2. **Libre de emisiones en sitio por el uso de energía.** Las emisiones directas de CO_{2e} de la edificación por el uso de energía son iguales a cero.
3. **Alimentado únicamente por energía limpia.** Toda la energía utilizada por la edificación, tanto en el sitio como fuera del sitio, proviene de fuentes de energía limpias.

El segundo enfoque está relacionado con las emisiones de CO_{2e} asociadas a los procesos de extracción, transporte y fabricación de materiales, la maquinaria, equipos utilizados en la construcción, mantenimiento y reparación de edificios, y el uso o aprovechamiento de los materiales una vez el edificio haya cumplido su ciclo de vida (etapas A1-A5, B1-B5, C1-C4 y D) de la Fig. 3; y que en adelante se denominará Edificaciones Neto Cero – Embebido (ENC-E) [59].

Una ENC es aquella en la que las emisiones totales de CO_{2e} son iguales a cero como se muestra en la ecuación 10. Lograr una ENC implica reducir las emisiones de CO_{2e} en los dos enfoques descritos anteriormente tanto como sea posible y luego hacer compensaciones [12].

$$0 \geq E_T = (E_{CE} + E_{CO}) - R \quad (10)$$

Donde:

E_T son las emisiones totales en tCO_{2e}

E_{CE} son las emisiones de carbono embebido en tCO_{2e}

E_{CO} son las emisiones de carbono operacional en tCO_{2e}

R son las compensaciones totales asociadas al uso de energías renovables en tCO_{2e}

Con base en la ecuación 10, se puede realizar una representación gráfica de los diferentes tipos de edificación dependiendo de la cantidad de emisiones de CO_{2e}, como se muestra en la Fig. 21. Esta figura ilustra cómo las edificaciones pueden evolucionar de tener altas emisiones de CO_{2e} a ser regenerativas mediante la implementación de compensaciones y mejoras en su diseño y operación.

En esta figura se puede observar que el punto 1 representa una edificación con altas emisiones de CO_{2e}, probablemente construido sin consideraciones ambientales ni conformidad con estándares de energía. Continuando de derecha a izquierda entre el punto 1 y 2, se encuentran

edificaciones sostenibles que cumplen con estándares de energía y que generan menos emisiones. En el punto 2 se representa una edificación con emisiones muy bajas, donde posiblemente se han aplicado múltiples estrategias para lograr reducir las emisiones con las tecnologías actuales. En el punto 3 se encuentra una edificación carbono cero, o ENC, donde las emisiones de CO_{2e} a la derecha (en gris) se equilibran con las compensaciones a la izquierda (en verde), por ejemplo, mediante el uso de energías renovables, recolección de agua de lluvia, compostaje y construcción con materiales de baja energía embebida. Por último, cualquier edificación que esté entre el punto 3 y 4 se considera regenerativa, ya que compensa más emisiones de las que genera.

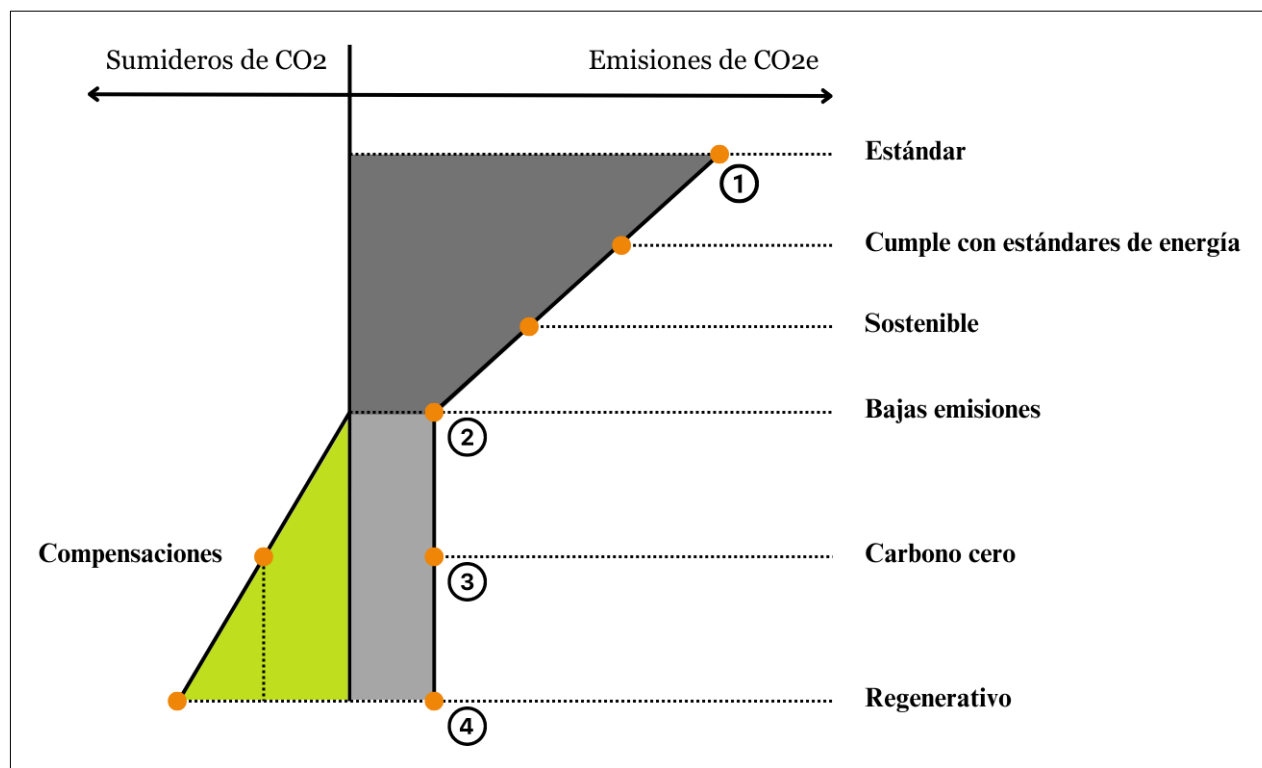


Fig. 21 Clasificación de edificaciones de acuerdo con sus emisiones de CO_{2e}

Nota: Figura adaptada de Carbon-Neutral Architectural Design [12].

b) *Proceso de diseño para Edificaciones Neto Cero*

Lograr Edificaciones Neto Cero (ENC) desde el proceso de diseño implica realizar análisis de diferentes aspectos de las edificaciones a distintas escalas para obtener las emisiones de CO_{2e} generadas principalmente durante la construcción y operación de estas. Pablo La Roche [12], propone un enfoque de diseño conocido como “Proceso de Diseño Arquitectónico Neutro en

Carbono” (CNDP, por sus siglas en inglés), el cual tiene como objetivo diseñar ENC y está estructurado para organizar de manera efectiva los pasos y estrategias que contribuyan a la reducción de estas emisiones. La Fig. 22 muestra las cuatro fases en las que se divide el CNDP, descritas a continuación:

1. **Requerimientos.** Es la primera fase y se establecen los objetivos de eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ) de la edificación. Además, se genera la línea base de emisiones de CO_{2e} relacionadas con la construcción y operación, normalmente expresada en toneladas de CO_{2e}-año (tCO_{2e}-año).
2. **Diseño.** En esta fase el equipo de diseño, a través de un proceso iterativo, genera y evalúa alternativas orientadas a cumplir con los objetivos de eficiencia energética y de IEQ y reducir los valores de la línea base de emisiones establecida en la fase 1. Como resultado de este proceso de diseño se genera toda la documentación necesaria para la ejecución del proyecto.
3. **Construcción.** Esta fase se llevan a cabo todas las acciones de construcción sostenible para implementar lo establecido en el diseño y cumplir con los objetivos definidos en la fase 1.
4. **Operación.** En esta fase se espera que, luego de evaluaciones y auditorías, la edificación opere con una alta eficiencia energética y de IEQ, manteniendo una línea base de emisiones baja que permita estar lo más cerca posible a una Edificación Neto Cero.

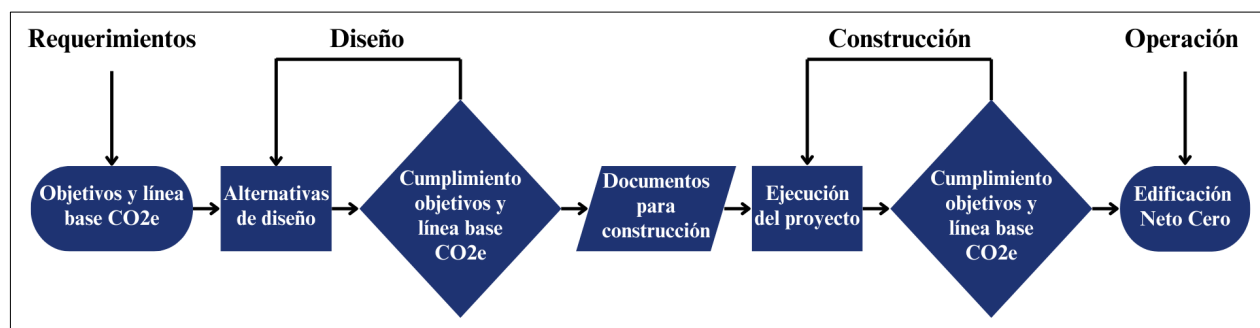


Fig. 22 Proceso de diseño arquitectónico neutro en carbono (CNDP)

c) Evaluación de Edificaciones Neto Cero

De acuerdo con la Fig. 21 una edificación neto cero debe demostrar que sus emisiones anuales de CO_{2e} son compensadas completamente. La evaluación de las Edificaciones Neto Cero (ENC) se realiza contemplando las emisiones de CO_{2e} generadas a partir de los enfoques de

Edificaciones Neto Cero – Embebido (ENC-E) y Edificaciones Neto Cero – Operacional (ENC-O). Las emisiones de carbono embebido son calculadas con base en lo establecido en el numeral 2 de este capítulo y las emisiones de carbono operacional son calculadas a partir de los flujos de energía utilizados para evaluar Edificaciones Cero Energía (ECE) más las generadas por las fugas de refrigerante de los sistemas de climatización existentes.

Una vez se tengan contabilizadas las emisiones de CO_{2e} se realiza un balance anual como se muestra en la ecuación 11 [54].

$$EGEI_{netas} = [\sum(E_{sum} \times FGEI_{sum}) + \sum(REF_{fugas} \times FGEI_{ref})] - [\sum(E_{exp} \times FGEI_{exp}) + (ER_{sum} \times FGEI_{ren-sum} \times FD_{ren-sum}) + CC] \quad (11)$$

Donde:

$EGEI_{netas}$ son las emisiones de gases efecto invernadero netas expresadas en tCO_{2e}

E_{sum} es la energía suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio en kWh

$FGEI_{sum}$ es el factor de emisión por energía suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio, para Colombia es 0.112 tCO_{2e}/MWh (0.000112 tCO_{2e}/kWh)

REF_{fugas} son las emisiones de gases efecto invernadero por fugas de refrigerantes cruzando la frontera de análisis del sitio expresadas en tCO_{2e}

$FGEI_{ref}$ es el factor de emisión por cada tipo de refrigerante según el anexo 1

E_{exp} es la energía exportada cruzando la frontera de análisis del sitio en kWh

$FGEI_{exp}$ es el factor de emisión por energía exportada cruzando la frontera de análisis del sitio, para Colombia es 0.112 tCO_{2e}/MWh (0.000112 tCO_{2e}/kWh)

ER_{sum} es la energía renovable certificada suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio en kWh

$FGEI_{ren-sum}$ es el factor de emisión de la energía renovable certificada suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio

$FD_{ren-sum}$ es el factor de descuento de la energía renovable certificada suministrada cruzando la frontera de análisis del sitio, para sistemas funcionando antes de 2022 entre 0.8 y 0.85 y para sistemas funcionando después de 2022, 0.95

CC son las compensaciones de carbono certificadas

d) Implementación de energías renovables para lograr Edificaciones Neto Cero

Para lograr Edificaciones Neto Cero (ENC) es necesario integrar tecnologías avanzadas que permitan lograr una alta eficiencia energética en conjunto con estrategias de diseño pasivo desde las etapas tempranas de diseño lo cual es coherente con los principios fundamentales de las Edificaciones Cero Energía (ECE). Los aspectos relacionados con la eficiencia energética y el diseño pasivo fueron tratados en los numerales 3 y 4 de este capítulo, mientras que en este apartado trataremos de manera general lo correspondiente al uso de energías renovables que tienen el potencial de ser implementadas en la Universidad del Valle partiendo de la premisa que una ENC produce en sitio o compra suficiente energía renovable libre de carbono (máximo 20%) para cubrir sus necesidades de consumo anual y durante su ciclo de vida.

Las energías renovables hacen uso de los recursos naturales disponibles como sol, viento, agua y biomasa y a diferencia de las energías provenientes de combustibles fósiles no generan emisiones de gases efecto invernadero durante su generación. Las energías renovables pueden clasificarse en función de sus características de generación y almacenamiento, así como de su integración en los sistemas energéticos existentes.

1. Energía solar. La energía solar es generada a partir de la radiación solar mediante paneles fotovoltaicos que convierten la luz solar directamente en electricidad o sistemas solares térmicos que aprovechan el calor principalmente para aplicaciones de calentamiento de agua. De acuerdo con la Fig. 11, la radiación solar promedio y máxima absoluta registrada en Cali a las 12 PM es de 857 y 1,139 W/m², respectivamente, más la duración del período de brillo solar que está entre 5 y 6 horas diarias, indican que en Cali se tiene un potencial moderado para la implementación de sistemas de generación de energía solar ya que si tomamos la franja entre las 10 AM y las 2 PM el promedio de radiación solar es de tan solo 630 W/m², asumiendo un cielo despejado. Los dos principales desafíos están en la baja eficiencia de los paneles fotovoltaicos nuevos, que actualmente puede estar entre un 18% y 22% [60] y la pérdida gradual de eficiencia va disminuyendo a una razón promedio de 0.6% anual debido al deterioro durante sus 25 años de vida útil, además de la necesidad de poder almacenar la energía generada debido a la intermitencia en la generación solar. Teniendo en cuenta la eficiencia promedio típica de los sistemas fotovoltaicos y su degradación, el área mínima requerida para producir 1 kW capacidad instalada es de 8 m² aproximadamente, lo que puede llegar a limitar su

implementación en edificaciones y entornos urbanos. Además es importante recalcar que cuantificar el efecto que tiene la nubosidad sobre los valores de radiación solar medidos puede limitar un poco más el uso de este tipo de energía.

2. **Energía Eólica.** La energía eólica es aquella que se obtiene a partir de la fuerza del viento utilizando aerogeneradores que transforman la energía cinética de las corrientes de aire en energía eléctrica. Aunque a nivel global la energía eólica cada vez es más popular, la implementación de proyectos a gran escala requieren velocidades del viento mínimas frecuentes de al menos 7 m/s además de amplias superficies para la instalación de los aerogeneradores lo que limita su implementación a grandes parques eólicos terrestres o marinos donde las velocidades del viento y el área disponible son propicios para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, existe un mejor indicador del régimen del viento que la misma velocidad del viento para evaluar el potencial de un sitio para generar energía eólica denominado Densidad de Energía Eólica (WPD, por sus siglas en inglés), el cual se basa en la relación cúbica entre la potencia del viento y la velocidad y se calcula según la ecuación 12 [61]. Con base en los datos registrados de velocidad del viento en la estación meteorológica de Univalle, para Cali la WPD es de 0.184 W/m² valor muy por debajo de los 210 W/m² mínimos requeridos para zonas con velocidades del viento de 7 m/s, lo que ratifica que Cali no cuenta con potencial para llevar a cabo proyectos de generación de energía eólica.

$$WPD = 0.5 \times \rho \times v^3 \quad (12)$$

Donde:

WPD es la Densidad de Energía Eólica en el sitio en W/m²

ρ es la densidad del aire del sitio, para Cali 1.225 kg/m³

v es la velocidad del viento promedio durante las 24 horas, para Cali 0.67 m/s

3. **Energía hidráulica.** La energía hidráulica es una forma de energía renovable obtenida a partir del movimiento y la fuerza del agua de ríos y mares principalmente. Una de las aplicaciones más comunes de la energía hidráulica es la energía generada en una central hidroeléctrica la cual utiliza presas y turbinas para convertir la fuerza del agua en electricidad. Existe una

opinión general de que la electricidad generada en hidroeléctricas es la fuente de energía renovable por excelencia, ya que difícilmente se agota, no genera emisiones directas de contaminantes y es más atractiva económicamente que otras opciones como la solar o la eólica. Además, las centrales hidroeléctricas emiten mucho menos gases de CO_{2e} que las plantas térmicas. En Colombia, la generación de electricidad en hidroeléctricas representa un 67.1% de la matriz energética nacional [62] gracias a la abundancia de recursos hídricos del país. No obstante, la implementación de centrales hidroeléctricas traen retos económicos importantes por sus altas inversiones iniciales sumado a los impactos tanto sociales como ecológicos los cuales afectan la calidad de vida de las poblaciones y la biodiversidad, además de hacer los proyectos inviables en términos de sostenibilidad. Adicionalmente, el funcionamiento de las hidroeléctricas depende de la geografía del terreno, el clima y los fenómenos ambientales como el fenómeno del Niño, que trae consigo amplios periodos de sequía. Cali pertenece a la matriz energética regional del Valle del Cauca donde según datos de la Gobernación del Valle, el departamento cuenta con una matriz energética diversificada donde prácticamente el 99% es renovable; tiene el 13% de cogeneración a partir de biomasa, el 0.7% proviene de energía solar, el 0.7% de centrales térmicas y 85% de hidroeléctricas [63]. Lo anterior, convierte a Cali y la región en referentes estratégicos para lograr cumplir con los compromisos internacionales en términos de sostenibilidad.

4. **Biomasa.** La energía proveniente de la biomasa incluye leña, residuos agrícolas, desechos animales, carbón vegetal y otros combustibles derivados de fuentes biológicas. Esta energía se produce mediante la combustión directa, la digestión anaeróbica o la gasificación de la biomasa, generando calor, electricidad o biocombustibles. En Colombia, y particularmente en el Valle del Cauca, la biomasa juega un papel importante debido a la gran producción de residuos agroindustriales, especialmente los derivados de la caña de azúcar lo que permite producir bioetanol y cogenerar electricidad. En 2023, en el sector azucarero que representa el 76% de la industria agrícola del departamento, se cogeneraron 1,800 GWh de energía eléctrica, lo que representó un incremento de 3.2% frente al registro de 2022. Esta energía eléctrica fue suficiente para atender los requerimientos de los procesos productivos en los ingenios y para entregar 811 GWh de excedentes al Sistema Interconectado Nacional (SIN) [64]. En la actualidad existe amplia controversia en la sostenibilidad real de la biomasa dada que la reabsorción del CO_{2e} es extremadamente lenta, y efectivamente impráctica.

e) Sistemas de gestión energética y monitoreo

En el contexto de las Edificaciones Neto Cero (ENC), los sistemas de gestión energética y monitoreo desempeñan un papel trascendental para garantizar que el consumo energético total de la edificación sea igual o inferior a la energía renovable generada en sitio o la comprada desde el exterior. Estos sistemas integran tecnologías avanzadas como sensores, contadores inteligentes y plataformas digitales de análisis que permiten medir y gestionar el uso de energía en tiempo real, facilitando de esta manera el cumplimiento de los objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad. También, proporcionan datos precisos que ayudan a identificar oportunidades de ahorro, prever tendencias de consumo y mejorar la operación de sistemas clave como la iluminación, la climatización, y equipos mecánicos.

Un marco normativo global para la implementación de estos sistemas es la ISO 50001, un estándar internacional que proporciona un enfoque sistemático para mejorar continuamente el desempeño energético de las organizaciones. Esta norma promueve la identificación de oportunidades de mejora, la implementación de tecnologías eficientes y la integración de sistemas de monitoreo que permitan el seguimiento de indicadores energéticos críticos. En el contexto de las ENC, la adopción de la ISO 50001 asegura que las estrategias de gestión energética no solo sean efectivas, sino también auditables y alineadas con metas de sostenibilidad.

En el contexto local, Cali cuenta con el Manual de Construcción Sostenible [44], donde se establecen tres estrategias de gestión energética y monitoreo que pueden ser aplicables a ENC, como son:

- 1. Estrategia de medición calibrada en cuatro cuadrantes (bidireccional).** La medición de energía calibrada en cuatro cuadrantes se refiere a la capacidad de los medidores para registrar el flujo de energía en ambas direcciones: desde la red convencional hacia los puntos de consumo y desde los puntos de consumo hacia la red. Esto permite un monitoreo preciso de la energía consumida y la energía generada o inyectada de vuelta a la red, asegurando un control integral y bidireccional del flujo energético.
- 2. Estrategias de medición por sectores y centros de consumo.** La medición de energía por sectores o usos permite obtener indicadores específicos sobre el consumo eléctrico en diferentes áreas o sistemas dentro de una edificación. Esto facilita la identificación de oportunidades de

mejora y la implementación de estrategias de ahorro energético sectorizadas, enfocándose en aquellos sectores o equipos que presentan una mayor demanda energética.

- 3. Estrategias de monitoreo remoto de consumo en tiempo real.** En la actualidad, los sistemas de energía solar fotovoltaica de autoconsumo están equipados con dispositivos avanzados que permiten monitorear y visualizar tanto la generación de energía como el consumo en tiempo real. Esta capacidad proporciona indicadores constantes para comparar el consumo con la generación, facilitando la toma de decisiones que contribuyan al cumplimiento de objetivos de ahorro energético. Además, este enfoque asegura un monitoreo continuo que optimiza la eficiencia y el desempeño del sistema durante toda su vida útil.

Al integrar estas estrategias con los principios de la ISO 50001, las ENC pueden establecer sistemas de gestión energética robustos que no solo faciliten el monitoreo, sino que también aseguren una mejora continua en el desempeño energético de la edificación.

7) Calidad ambiental interior en edificaciones educativas

a) Definición

La Calidad Ambiental Interior (IEQ) de una edificación contempla aspectos críticos relacionados con el confort térmico, la Calidad del Aire Interior (IAQ), el confort visual y lumínico y el confort acústico, y desempeña un papel fundamental en la salud, bienestar y productividad de las personas debido a que en promedio pasamos más de un 90% del tiempo de nuestras vidas al interior de una edificación, mientras que en el contexto educativo, los estudiantes pueden llegar a pasar entre un 20% y 30% de su tiempo en salones de clase lo que resalta la importancia de tener una adecuada IEQ [65]. Un aspecto relevante relacionado con la IEQ es el síndrome del edificio enfermo¹⁷ (SBS, por sus siglas en inglés) que se reportó por primera vez en la década de 1980 a medida que disminuían las tasas de ventilación para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones, con costos anuales significativos y pérdidas de productividad debido a los síntomas de salud y enfermedades atribuibles a la baja IEQ [66] como gripes, y otras enfermedades de transmisión aérea.

¹⁷ Edificaciones climatizadas o ventiladas naturalmente donde sus ocupantes presentan quejas relacionadas con su salud en una proporción mayor a la que sería razonable esperar y las causas son difíciles de identificar dado que en muchos casos tienen un origen multifactorial.

En edificaciones de tipo educativo es razonable priorizar la IEQ por encima de la eficiencia energética, ya que la IEQ puede incidir significativamente en la función cognitiva de los estudiantes, optimizando su capacidad para tomar decisiones, concentrarse y retener información lo que ratifica la importancia de pensar desde las etapas tempranas de diseño de las edificaciones en cómo lograr y mantener una elevada IEQ durante todo su ciclo de vida. Adicionalmente, en el ámbito de la sostenibilidad la IEQ juega un papel importante ya que es un pilar fundamental en lograr el máximo bienestar de las personas al interior de una edificación y permite cumplir con criterios establecidos por certificaciones internacionales como LEED¹⁸, WELL¹⁹, y EDGE²⁰.

b) Confort térmico

El confort térmico está definido por el estándar ANSI/ASHRAE 55 “*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*” como la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es valorado mediante una evaluación subjetiva. Según Herrera y Rosillo [67], lograr confort térmico requiere un enfoque integral que combina la ingeniería mecánica con el diseño arquitectónico, considerando aspectos como la inercia térmica de los materiales, las tasas de intercambio de calor entre las personas y el entorno y los índices normativos como el valor medio predictivo (PMV, por sus siglas en inglés) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD, por sus siglas en inglés) los cuales permiten evaluar el confort térmico en un espacio.

El confort térmico se ve afectado por varios factores que afectan la tasa de disipación de calor del cuerpo: cuatro de ellos relacionados con las condiciones ambientales del entorno (temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire, y humedad) y los otros dos relacionados con variables personales (nivel de actividad y tipo de vestimenta). Estos factores permiten también calcular el PMV y PPD. El PMV es un índice que representa la sensación térmica promedio que se espera de un grupo de personas en un ambiente dado en una escala de 7 puntos de sensación térmica que va desde -3 (muy frío) hasta +3 (muy caliente) mientras que el PPD es un índice que proporciona una predicción cuantitativa del porcentaje de personas insatisfechas térmicamente determinado a partir del valor del PMV.

¹⁸ Certification en “*Leadership in Energy and Environmental Design*”

¹⁹ Certificación que valora las mejores prácticas en diseño y construcción enfocadas en generar bienestar a los usuarios

²⁰ Certificación de construcción sostenible que se enfoca en hacer edificios más eficientes

Entender las variables que afectan el confort térmico y cómo interactúan entre sí es fundamental para diseñar edificaciones térmicamente confortables y sostenibles. En espacios interiores, estas variables pueden ser controladas mediante sistemas de climatización que enfrían y deshumidifican el aire cuando las ganancias de calor de la edificación son elevadas en climas como el de Cali, sin embargo, un diseño arquitectónico eficiente de la envolvente de la edificación, que minimice las ganancias térmicas solares y facilite la ventilación natural, hará que, por ejemplo, la temperatura media radiante sea baja y como resultado mejore el confort térmico y reduzca la necesidad de usar sistemas de climatización.

Lograr espacios confortables es fundamental para garantizar la productividad, la salud y el bienestar de los ocupantes en una edificación, especialmente en entornos educativos donde la capacidad de concentración y el rendimiento académico pueden verse significativamente afectados por ambientes que térmicamente no ofrezcan unas condiciones adecuadas. En este sentido, diversos estudios [68] han demostrado que en un salón de clases en etapa escolar, el rendimiento académico de los estudiantes mejora significativamente cuando la sensación térmica cambia de “cálida” a “neutral”. En particular, al reducir la temperatura ambiental de 25°C a 20°C, se observa un incremento hasta de un 12% en los resultados de pruebas numéricas y de lenguaje evidenciando la influencia directa del confort térmico en el desempeño cognitivo.

Para evaluar el confort térmico en edificaciones existentes o realizar predicciones en etapa de diseño de edificaciones nuevas, existen herramientas en línea gratuitas respaldadas por ASHRAE, como el CBE Comfort Tool y CBE 3D Mean Radiant Temperature Tool [69], [70]. La primera permite calcular y visualizar el nivel de confort térmico a partir de los estándares ANSI/ASHRAE 55, ISO 7730 y EN 16798-1 y la segunda calcula y muestra la temperatura media radiante y el confort térmico previsto dentro de un espacio basado en las temperaturas de la superficie del espacio y las ganancias solares a través de ventanas y tragaluces incluyendo variables como el nivel de actividad y tipo de vestimenta.

Recientemente, se ha planteado el concepto de “salud térmica”, que amplía el enfoque tradicional del confort térmico al considerarlo un componente crítico para la salud humana. Este enfoque sugiere cambiar el término confort térmico por “salud térmica” argumentando que el uso de la palabra “confort” coloca la responsabilidad en el individuo y sugiere que el problema es sobre las percepciones de los ocupantes en lugar de la edificación y no reconoce que este sea un problema de salud, simplemente que es un problema de sentirse o no confortable. Se ha demostrado que

cuando los ambientes interiores son demasiado calurosos, se aumentan los síntomas del síndrome del edificio enfermo, se tienen estados de ánimo negativos, alta frecuencia cardíaca, síntomas respiratorios y fatiga [66]. En este sentido la salud térmica, es un componente clave para lograr edificaciones saludables y su adecuada gestión puede mejorar significativamente la calidad de vida y la productividad de las personas. En resumen para lograr diseñar, construir, operar y mantener edificaciones que promuevan tanto el confort como la salud térmica se deben tener en cuenta aspectos como:

- Cumplir con los estándares mínimos de temperatura y humedad relativa.
- Proporcionar control térmico de nivel individual cuando sea posible.
- Inspeccionar el área y los ocupantes con regularidad para identificar las zonas que tienen un rendimiento deficiente (temperaturas muy altas o muy bajas).
- Responder y evaluar las inquietudes de los ocupantes.
- Reducir la ganancia de calor solar de la edificación.
- Mejorar la eficiencia de las ventanas.
- Agregar revestimientos para techos que absorban menos radiación solar.
- Controlar y monitorear la temperatura y la humedad relativa en tiempo real para prevenir y resolver problemas de confort térmico con prontitud.

c) Calidad del aire interior

La Calidad del Aire Interior (IAQ) es uno de los factores que determinan la funcionalidad, el bienestar y la calidad de vida que ofrece una edificación. La IAQ se refiere a los tipos y concentraciones de contaminantes transportados por el aire que se encuentran en las edificaciones y está determinada principalmente por las concentraciones de CO₂, los compuestos orgánicos volátiles (COV)²¹, el material particulado (PM), cantidad de microorganismos potencialmente infectantes, y otros contaminantes, además de las tasas de ventilación (aire fresco y limpio) en los espacios. La IAQ afecta a sus ocupantes, la capacidad para llevar a cabo sus actividades, la salud, e impacta positiva o negativamente en usuarios habituales y visitantes. Cuando la IAQ es deficiente, los propietarios y operadores de las edificaciones tienen que dedicar recursos

²¹ Los COV son una amplia clase de productos químicos presentes en pinturas, materiales de construcción, productos de aseo, muebles, entre otros, que se evaporan liberando sustancias tóxicas nocivas para la salud humana.

considerables para resolver las quejas de los usuarios relacionadas con la salud, el confort y la productividad. Según estudios [71], la productividad en las personas puede verse afectada hasta en un 10% en un edificio de oficinas, mientras se torna un poco más severa en ambientes de tipo educativo donde la productividad puede disminuir hasta en un 20% cuando se tiene una deficiente IAQ.

Los efectos que resultan de una deficiente IAQ incluyen irritación en ojos y garganta, fatiga mental, náuseas, la enfermedad de legionario, intoxicación por CO₂, y el contagio por vía aérea de patógenos infecciosos, entre otros. Los efectos más generalizados en la salud incluyen el aumento de alergias y asma debido a la exposición de contaminantes internos de la edificación (particularmente los asociados con la humedad y el moho de la construcción), los resfriados y otras enfermedades infecciosas que se transmiten a través del aire y los síntomas del síndrome del edificio enfermo. Estos factores más generalizados tienen el potencial de afectar a un gran número de usuarios de edificaciones y están asociados con costos significativos debido a los gastos por incapacidades médicas y pérdida de productividad. Se estima que una buena IAQ reduce potencialmente los costos asociados a incapacidades médicas y ausentismo y mejora el desempeño laboral y cognitivo de las personas.

Una buena IAQ puede lograrse manteniendo unas adecuadas tasas de ventilación con aire fresco y limpio y ejerciendo un control minucioso sobre los contaminantes. En entornos de aprendizaje en etapa escolar, por ejemplo, lograr mantener los niveles de CO₂ por debajo de las 900 ppm puede llegar a mejorar el rendimiento de un estudiante en términos de velocidad de respuesta hasta un 12% y su precisión alrededor de un 2%. Asimismo, duplicar las tasas de ventilación puede aumentar la velocidad de respuesta en 8% aproximadamente en actividades relacionadas con las matemáticas y comprensión de textos. Además, por cada Litro/segundo por persona de aire fresco y limpio adicional que se use para renovar el aire en un espacio climatizado se puede reducir el ausentismo hasta en un 1.5% [72]. Si bien el ser humano puede ser más vulnerable a los efectos de una IAQ deficiente en su etapa de niñez y adolescencia, los adultos jóvenes en entornos universitarios también pueden experimentar impactos negativos en su rendimiento cognitivo y bienestar general cuando la IAQ no es buena. Como valor agregado, los anjeos y la ventilación permiten la remoción los zancudos, y además evacúan el aire caliente y refrescan el espacio. Por todo queda claro que es crucial implementar estrategias de ventilación y

control de contaminantes que promuevan un ambiente saludable y propicio para el aprendizaje en todos los entornos educativos.

En la práctica profesional es común tomar como referencia durante la fase de diseño de una edificación el estándar ANSI/ASHRAE 62.1 “*Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*” [48] el cual especifica las tasas mínimas de ventilación (aire fresco y limpio) y otras medidas destinadas a proporcionar una IAQ que sea aceptable para los ocupantes (excepto de tipo residencial) y que minimice los efectos adversos para la salud humana. Además, este estándar ofrece tres procedimientos diferentes para calcular los requerimientos de ventilación de espacios ventilados o climatizados incluyendo la evaluación de la calidad del aire exterior, requisitos para el diseño, construcción y puesta en marcha de sistemas y equipos, operación, mantenimiento y commissioning. Sin embargo, se ha demostrado que para lograr niveles altos de IAQ con impactos significativos sobre la salud y productividad de los ocupantes de una edificación, puede requerirse que las tasas de ventilación recomendadas por el estándar 62.1 se incrementen hasta en un 30% [66]. Recomendaciones adicionales para lograr una buena IAQ se describen a continuación:

- Seleccionar materiales con bajas emisiones de COV.
- Minimizar contaminantes por las actividades de los ocupantes.
- Evaluar el nivel de contaminantes en el aire exterior.
- Filtrar y purificar el aire exterior.
- Diseñar y mantener la envolvente de la edificación y los equipos para evitar condensación.
- Evitar los aerosoles perfumados y los agentes de limpieza con alto contenido de COV.
- Monitorear en tiempo real el nivel de contaminantes al interior del edificio.
- Usar tecnologías de purificación del aire que tengan suficiente evidencia científica.
- Mejorar las rutinas y procedimientos de limpieza de superficies y componentes del sistema de climatización.

d) Confort lumínico y visual

El confort lumínico y visual también es un aspecto clave en la Calidad Ambiental Interior (IEQ) de las edificaciones ya que incide en el bienestar, estado de ánimo, productividad y salud visual de los ocupantes, sin dejar a un lado el impacto que esto puede traer sobre otros aspectos como el confort térmico y la eficiencia energética de la edificación. El confort lumínico es definido

como la percepción de los usuarios respecto a la cantidad, calidad y la distribución de la luz en un espacio mientras que el confort visual considera cómo las personas perciben y responden a estas condiciones de iluminación. Dentro de los factores que más influyen sobre el confort lumínico y visual están:

- **Cantidad de luz (iluminancia).** Representa la cantidad de luz incidente sobre una superficie medida en lux. La norma europea sobre la iluminación para interiores UNE 12464-1 establece rangos de iluminancia que van desde los 300 lux para aulas de tutoría hasta los 750 lux para aulas destinadas al dibujo técnico o al arte.
- **Calidad de la luz.** Incluye aspectos como la temperatura de color y el índice de reproducción cromática (CRI). Una temperatura de color adecuada para entornos educativos está entre 4,000 y 5,000 Kelvin.
- **Deslumbramiento.** Ocurre cuando la intensidad de la luz es excesiva o mal direccionada. Se mide mediante el Unified Glare Rating (UGR), cuyo valor promedio es 19 para ambientes educativos.
- **Distribución y uniformidad.** Una iluminación homogénea debe evitar zonas de sombra pronunciadas que favorezcan la funcionalidad y reduzcan el esfuerzo ocular. El coeficiente de uniformidad recomendado debe ser mayor a 0.7 en espacios de trabajo.
- **Integración de luz natural.** La iluminación natural mejora el confort lumínico pero deben tenerse precauciones para evitar el deslumbramiento y las ganancias solares.

En ambientes de tipo educativo, una buena iluminación proporciona a los estudiantes y profesores un ambiente agradable y estimulante que les permite desarrollar sus actividades con enfoque y concentración sin demandar un sobre esfuerzo visual, reduciendo el cansancio y dolores de cabeza producidos por una iluminación inadecuada, además de ayudar a regular los ritmos circadianos promoviendo un mejor descanso y bienestar general. En particular en las aulas de clase, el color de la luz emitida por las lámparas tiene también una gran importancia en el comportamiento de los alumnos y en su productividad, como por ejemplo, las lámparas de luz fría proporcionan un ambiente similar al aire libre que ayuda a evitar la sensación que pueden sufrir algunos alumnos por la permanencia de varias horas en un recinto cerrado, mientras que las lámparas de colores cálidos proporcionan ambientes más sociables y relajados.

Estrategias de iluminación que integren la iluminación natural con luminarias eficientes y sistemas de iluminación dinámica que ajustan la temperatura de color y la intensidad lumínica a lo largo del día contribuyen satisfactoriamente al confort visual y la productividad. En ambientes educativos donde no sea posible el uso de luz natural, se puede lograr una óptima iluminación utilizando una combinación de luminarias de distribución directa y distribución indirecta. La distribución directa es la que toda la luz se irradia hacia abajo mientras que la distribución indirecta es la que toda la luz se irradia hacia arriba y luego se refleja hacia abajo desde el cielo falso o techo. Existen numerosas técnicas para optimizar la iluminación natural, incluyendo al menos veintidós estrategias descritas en el informe “*Daylight in Buildings*” [73]. Estas técnicas se agrupan en dos categorías principales: sistemas con sombreado, diseñados para controlar la entrada de luz directa y difusa, y sistemas sin sombreado que incluyen soluciones para guiar la luz difusa o directa, dispersarla uniformemente o transportarla a largas distancias hacia áreas interiores. Una combinación directa/indirecta de 40%-60% o 60%-40% es recomendada para espacios como bibliotecas y oficinas mientras que para aulas de clase la distribución directa está entre 10% y 40% y la indirecta entre 60% y 90% [73]. La correcta proporción del uso de luz natural y artificial dependerá del tipo de uso y actividad a realizar y las evaluaciones que se realicen en programas de simulación como DesignBuilder contemplando su impacto sobre el confort térmico y la eficiencia energética.

e) Confort acústico

El confort acústico también resulta un componente esencial dentro de la Calidad Ambiental Interior (IEQ) de las edificaciones ya que influye directamente en el bienestar, la salud y la productividad de sus ocupantes. El confort acústico se refiere a la percepción subjetiva de las condiciones sonoras de un espacio abarcando factores como el nivel de ruido, el tiempo de reverberación y el aislamiento acústico. El ruido se puede definir como “sonido no deseado o perturbador” y es un factor que puede interferir significativamente con las actividades normales diarias como el trabajo, el aprendizaje, el sueño y las conversaciones. Las fuentes de ruido pueden ser externas a la edificación, como el tráfico vehicular, los aviones, los trenes, las cortadoras de césped y el uso de equipos pesados en sitios de construcción. También están las fuentes internas, que incluyen sistemas mecánicos y de climatización, equipos de oficina, aspiradoras, maquinaria industrial o incluso conversaciones entre las personas.

En un entorno académico, el ruido no solo es una clara distracción que impide que los estudiantes lleven a cabo sus actividades de manera precisa y eficiente, sino que también puede tener un impacto perjudicial en la salud y los niveles de estrés. Niveles de ruido superiores a los 35 dBA, se asocian con una disminución en el rendimiento cognitivo, especialmente en tareas como lectura, matemáticas y comprensión verbal [74]. Un estudio de 1998 encontró que hubo una caída de hasta un 66% en el rendimiento para una tarea de memorización cuando los participantes estuvieron expuestos a diferentes tipos de ruido de fondo [75].

Para mejorar el confort acústico en entornos educativos es fundamental implementar estrategias que aborden tanto las fuentes de ruido como su propagación tales como:

- Usar de materiales absorbentes y difusores como paneles acústicos en techos y paredes o elementos de fibra de vidrio y lana mineral.
- Minimizar el impacto del ruido exterior instalando ventanas de doble acristalamiento, fachadas aislantes y barreras físicas, como muros vegetales que atenúan el sonido proveniente de fuentes externas.
- Usar aislamiento acústico entre espacios como muros y puertas con un alto índice de reducción sonora.
- Realizar un diseño arquitectónico eficiente que puede separar las áreas ruidosas de las zonas de trabajo o estudio, mediante distribuciones que minimicen la propagación del sonido.

8) *Simulaciones de rendimiento en edificaciones*

Las simulaciones de rendimiento en edificaciones son herramientas avanzadas utilizadas para analizar y optimizar el comportamiento energético de los edificios. Estas simulaciones permiten prever el consumo energético, evaluar las cargas térmicas, modelar los sistemas de climatización y analizar las interacciones entre la envolvente de la edificación y los sistemas mecánicos y eléctricos. En el marco del diseño de Edificaciones Cero Energía (ECE) y Neto Cero (ENC), estas simulaciones no solo facilitan el cumplimiento de normativas como el estándar ASHRAE 90.1, sino que también ayudan a alcanzar los objetivos de eficiencia energética, reducción de costos de operación y la disminución del impacto ambiental.

El estándar ANSI/ASHRAE/IES 90.1 “*Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*” [37], establece los requisitos mínimos para el diseño energético de

edificaciones no residenciales. Su Apéndice G, conocido como el “*Performance Rating Method (PRM)*”, proporciona un marco metodológico para modelar y evaluar el rendimiento energético de edificaciones mediante simulaciones detalladas. El Apéndice G especifica que las simulaciones deben realizarse comparando dos modelos:

1. **Baseline (modelo de referencia):** Representa el diseño mínimo aceptable según los requisitos del estándar considerando factores como la zona climática, tipos de sistemas de climatización y densidades de potencia de iluminación (LPD, por sus siglas en inglés).
2. **Proposed Design (diseño propuesto):** Incluye las características de la edificación en diseño, reflejando mejoras en la eficiencia energética respecto al modelo “*baseline*”.

Ambos modelos se evalúan utilizando herramientas de simulación energética avanzadas como EnergyPlus o DesignBuilder, que permiten modelar hasta 8,760 horas anuales y simular el comportamiento de los sistemas de una edificación bajo condiciones reales de operación. Estas herramientas consideran elementos importantes como:

- **Envolvente de la edificación.** Evalúan las propiedades de aislamiento, transmitancia térmica (Valor U) y coeficientes de ganancia solar (SHGC).
- **Sistemas de climatización.** Optimizan la configuración y operación de los sistemas de climatización.
- **Iluminación artificial y natural.** Analizan el impacto de los controles automáticos y las densidades de potencia de iluminación.
- **Integración de energías renovables.** Analizan los sistemas fotovoltaicos o térmicos y su contribución al balance energético de la edificación.

Las simulaciones de rendimiento energético ofrecen múltiples beneficios para el diseño y operación de edificaciones ECE y ENC. Estas herramientas permiten identificar oportunidades de mejora desde las etapas tempranas del diseño, optimizando el desempeño energético y promoviendo soluciones más eficientes. Además, son fundamentales para demostrar el cumplimiento normativo y la conformidad con estándares internacionales y locales, así como para obtener certificaciones como LEED o EDGE. Otro beneficio significativo es la reducción de costos

de operación y emisiones de CO₂e, proyectando ahorros energéticos sostenibles a largo plazo. Finalmente, estas simulaciones garantizan una eficiencia energética óptima asegurando que la edificación funcione según las expectativas de diseño durante todo su ciclo de vida.

Aquí es preciso aclarar que la inteligencia artificial y la simulación no proporcionan el diseño, eso es una actividad meramente humana y por supuesto no se puede dejar a la intuición (ni a la estadística de datos), se espera, pues, que el diseñador sea una persona educada en este aspecto; una vez se tenga el diseño conceptual se puede aplicar la simulación para identificar potenciales mejoras. Cada diseño es único.

B. Hojas de ruta

1) Definición

Una hoja de ruta es un plan estratégico especializado que describe las actividades que una organización puede llevar a cabo durante plazos específicos para lograr los objetivos y resultados plasmados en esta [15]. Al implementar una hoja de ruta, se garantiza que un proyecto esté alineado con una visión clara, que las acciones sean coherentes y prioritarias, y que se optimice el uso de los recursos disponibles. Además, permite que los equipos involucrados trabajen de manera coordinada hacia metas comunes, evitando discrepancias y reduciendo riesgos de desviación.

Las hojas de ruta sirven como una herramienta esencial para la planificación estratégica ya que evitan incertidumbres al proporcionar un marco estructurado que orienta las decisiones y acciones hacia resultados específicos. Estas herramientas permiten anticiparse a los desafíos y priorizar acciones concretas para garantizar que las metas planteadas sean alcanzables dentro de los plazos estipulados. También son importantes para la gestión de recursos ya que aseguran su uso eficiente y efectivo, y para la generación de un consenso entre los actores involucrados que permite alinear sus expectativas y facilitar la colaboración [76].

Los elementos clave en el proceso de elaboración de una hoja de ruta son la definición de metas, hitos, brechas y barreras, acciones a realizar, prioridades y plazos. El proceso de elaboración de la hoja de ruta incluye dos tipos de actividades (juicio y consenso de expertos, y datos y análisis) y cuatro fases (Planeación y Preparación, Visión, Desarrollo, e Implementación y Monitoreo) como se muestra en la Fig. 23 [15]. Una vez que se completa la hoja de ruta, la Implementación y la

actualización aseguran la realización completa de la visión y los objetivos en los que queda enmarcado el proyecto.

Particularmente en el contexto de proyectos de sostenibilidad, las hojas de ruta se han convertido en un instrumento indispensable que ayudan a formular y ejecutar políticas públicas y estrategias a largo plazo que abordan temas complejos como la descarbonización y la eficiencia energética. De esta forma, una hoja de ruta no solo guía la ejecución de un proyecto sino que también establece un marco para su replicabilidad y escalabilidad lo que permite amplificar su impacto.

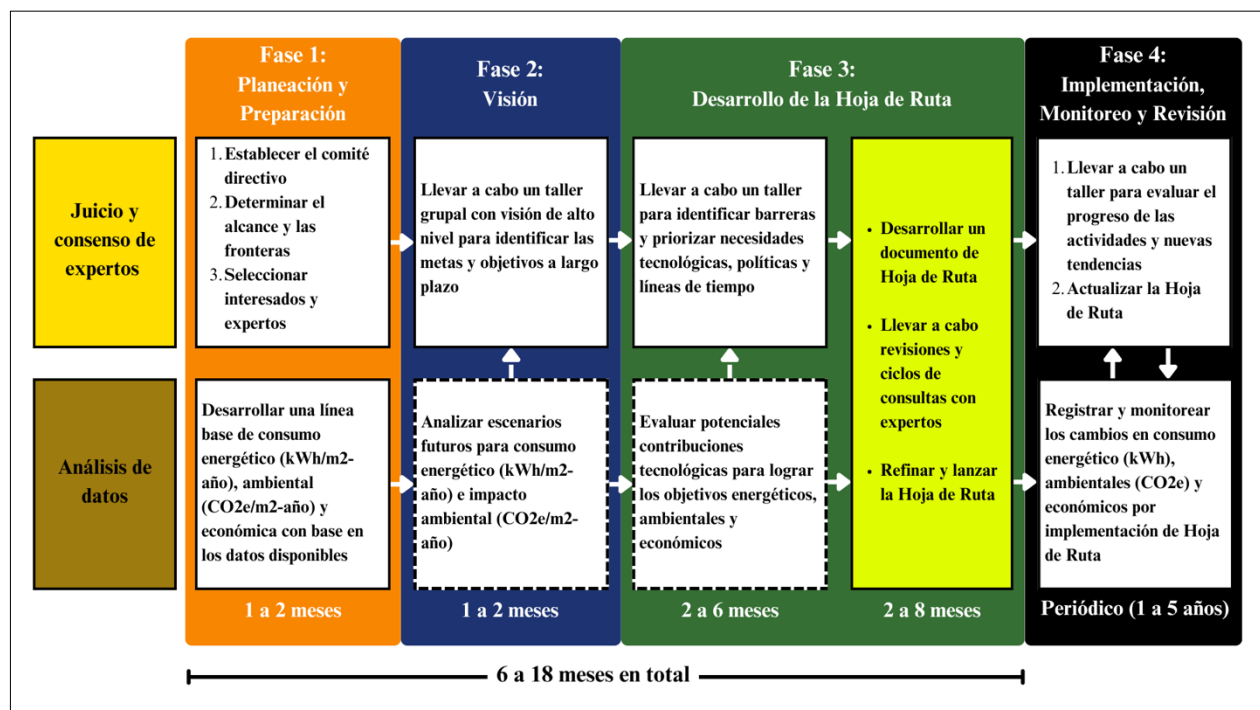


Fig. 23 Esquema del proceso de elaboración de una hoja de ruta

Nota: 1) Las líneas punteadas indican pasos opcionales, basados en las capacidades y recursos de análisis. 2) Imagen adaptada y traducida de *Energy Technology Roadmaps* [15].

2) Planeación y Preparación

La fase de Planeación y Preparación constituye el punto de partida en el desarrollo de una hoja de ruta. Durante esta etapa se definen el propósito y alcance del proceso que permiten establecer claramente los objetivos específicos que se quieren alcanzar. Desde esta fase es importante asegurar el compromiso, liderazgo y la participación de actores clave quienes guiarán

las decisiones y acciones a lo largo del proceso. Para lograr esto, se debe conformar un comité directivo encargado de orientar el desarrollo de la hoja de ruta y asignar responsabilidades claras, además se identifican los recursos necesarios, tanto humanos como técnicos, y se realiza una evaluación preliminar del estado actual a través de recolección de datos que servirán para definir líneas base y prioridades inmediatas. El producto principal de esta etapa es un documento de propósito y alcance que define las intenciones, los métodos y la estructura organizativa del proceso.

3) Visión

La Visión consiste en establecer una proyección a largo plazo que permita tener una guía para lograr los objetivos del proceso. En esta fase se establecen metas claras y cuantificables que puedan reflejar los resultados esperados. Para lograr esto, se llevan a cabo talleres de trabajo con expertos y actores clave en tecnología, políticas públicas, economía y otras disciplinas técnicas donde se busca generar consenso y formular una visión compartida. Al mismo tiempo, se realizan evaluaciones de escenarios futuros que permiten analizar diferentes proyecciones y anticipar riesgos y oportunidades. También, se formulan los principios que guían las decisiones y acciones en las etapas siguientes para asegurar que se mantenga la coherencia y el enfoque estratégico para alcanzar los objetivos.

4) Desarrollo de la hoja de ruta

El Desarrollo de la hoja de ruta es la etapa en la que se estructuran las acciones concretas necesarias para alcanzar la visión planteada. Aquí lo primero es identificar las brechas existentes, las barreras técnicas, económicas o culturales que podrían obstaculizar el proceso. Luego, se definen hitos que permiten medir el avance y orientar las acciones de manera escalonada. También, se definen las responsabilidades para cada actor involucrado, se organiza un cronograma detallado que integra actividades a corto, mediano y largo plazo y se definen los indicadores de desempeño que permitirán monitorear el progreso hacia el logro de los objetivos establecidos. En esta etapa se plasma la visión en un plan de acción estructurado, medible y ejecutable.

5) Implementación y Monitoreo

La Implementación y Monitoreo es la etapa donde la hoja de ruta se lleva a la práctica ejecutando las acciones definidas como prioridad, asignando los recursos necesarios y garantizando

la participación activa de los actores responsables. El monitoreo continuo permite evaluar los resultados obtenidos y detectar posibles desviaciones o retos a resolver por medio de indicadores que miden el desempeño de cada acción facilitando de esta manera la toma de decisiones y acciones correctivas necesarias. El proceso de monitoreo de la hoja de ruta debe ser dinámico y flexible, permitiendo revisar y ajustar las prioridades a medida que se obtienen resultados o cambian las condiciones externas del proyecto. Para esto, se programan revisiones periódicas que facilitan la incorporación de lecciones aprendidas para que las actividades que se están ejecutando sigan alineadas con los objetivos específicos. De esta manera, la hoja de ruta evoluciona y se adapta a diferentes retos y oportunidades mientras mantiene el enfoque en alcanzar los resultados esperados.

C. Validación técnica de la edificación (Commissioning)

1) Definición

La Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning es un proceso enfocado en la calidad para mejorar la ejecución y entrega de un proyecto [77]. La VTE incluye tareas específicas que se llevan a cabo para evaluar y documentar que todos los sistemas de una edificación se planifiquen, diseñen, instalen, prueben, operen y sean mantenidos de forma adecuada para cumplir con los requisitos del propietario del proyecto los cuales son plasmados en un documento conocido como “*Owner’s Project Requirements (OPR)*”. El OPR forma la base desde la cual se toman todas las decisiones de diseño, construcción y operación. Un proceso efectivo de VTE depende de un OPR claro, conciso y completo que se desarrolla en la fase de prediseño y que contiene los requisitos de aceptación, eficiencia energética, sostenibilidad, calidad ambiental interior, operación, mantenimiento, entre otros; para ayudar al equipo del proyecto a planificar, diseñar, construir, operar y mantener la edificación y sus sistemas adecuadamente [78].

El éxito de la VTE depende en gran medida del liderazgo de la Autoridad de Commissioning o Autoridad de VTE (AVTE). Este profesional, independiente y calificado, actúa como un facilitador entre propietarios o administradores, diseñadores y contratistas que asegura que lo definido en el OPR sea implementado y documentado en cada etapa del proyecto. La AVTE debe poseer experiencia en campo verificable y competencias técnicas avanzadas que incluyan conocimientos específicos en sistemas mecánicos, eléctricos, de control y de envolvente de la edificación, así como habilidades de gestión y comunicación efectiva para coordinar equipos

multidisciplinarios. Además, la AVTE debe estar involucrado desde las primeras fases del proyecto para garantizar que las metas de eficiencia energética, sostenibilidad y Calidad Ambiental Interior (IEQ) sean alcanzables y verificables. Esto incluye la supervisión de las pruebas funcionales de los sistemas, la revisión de los documentos de diseño y la evaluación de la operación de edificación antes de su entrega.

El valor agregado y los beneficios para el propietario generados por la Validación Técnica de la Edificación (VTE) se manifiestan en edificaciones con mayor desempeño energético, que ofrecen una mejor calidad ambiental interior y que sirven los usuarios de una manera más eficiente y práctica. La VTE está estructurada de manera integral para coincidir con las fases de un proyecto genérico como son el prediseño, diseño, construcción y operación.

2) Validación técnica de la edificación para el prediseño

El Prediseño es una fase preparatoria a la Validación Técnica de la Edificación (VTE) en la que se desarrollan y definen los requisitos del propietario del proyecto (OPR). En esta fase se recopila información fundamental sobre el proyecto, que incluye:

1. Listado de requisitos generales, como son las condiciones interiores del área a tratar, etc.
2. Afectaciones hacia el entorno exterior, por ejemplo, ruido de torres de enfriamiento, descarga de efluentes contaminados por sistemas de extracción, afectaciones en infraestructura pública, etc.
3. Aplicabilidad de leyes y regulaciones locales.
4. Caracterización de las condiciones del lugar y clima.
5. Función de la edificación, por ejemplo, si la edificación va a ser destinada a oficinas, un hospital, centro comercial, universidad, etc.
6. Tecnologías aplicables en el desarrollo del proyecto, como son energía solar fotovoltaica, recuperación de calor, almacenamiento térmico, nivel de complejidad del sistema de automatización, etc.
7. Sostenibilidad, por ejemplo, contenido de material reciclado, uso de eficiente de la energía, impacto con el medio ambiente, etc.
8. Costo.
9. Horario y perfil de ocupación de la edificación.

10. Necesidades generales del propietario, ocupantes, operadores y personal de mantenimiento.

Los objetivos de la VTE en esta fase incluyen:

1. Desarrollar el OPR.
2. Definir el alcance y presupuesto para el proceso de la VTE.
3. Desarrollar un plan de VTE para el proyecto.
4. Establecer y aprobar las actividades de VTE que se desarrollarán en esta fase.

3) *Validación técnica de la edificación para el diseño*

Durante la fase de diseño se crea un documento llamado Bases del Diseño (BoD, por sus siglas en inglés) que transmite claramente las suposiciones hechas en el desarrollo de una alternativa o solución de diseño que cumpla con la intención y los criterios del OPR. Este documento incluye descripciones narrativas de los sistemas a instalar y se amplía el plan de Validación Técnica de la Edificación (VTE) desarrollado en el prediseño para incluir detalles de las actividades que deberán ejecutarse en las fases de construcción y operación.

Las BoD, elemento clave es esta fase, debe documentar cada alternativa o solución de diseño detallando la siguiente información:

1. Tipos de sistema de climatización y su respectiva alternativa de instalación.
2. Suposiciones sobre la eficiencia energética y rendimiento de los sistemas seleccionados los cuales deberán incluir:
 - Suposiciones hechas para el cálculo y dimensionamiento de equipos y componentes
 - Procedimientos analíticos y herramientas tecnológicas usadas
 - Condiciones ambientales exteriores e interiores
 - Condiciones restrictivas del proyecto
 - Marcas y modelos de referencia seleccionados
 - Suposiciones operacionales del sistema
3. Descripción narrativa del sistema de climatización y su instalación.
4. Leyes, estándares, guías, regulaciones y otras referencias tenidas en consideración.
5. Directrices especiales del propietario del proyecto.

6. Guías de ingeniería y pautas arquitectónicas desarrolladas por el equipo de diseño u otros.

Los objetivos de la VTE en la fase de diseño incluyen:

1. Verificar que las bases del diseño estén alineadas con lo que requiere el OPR.
2. Actualizar el plan de VTE para incluir actividades correspondientes a las fases de construcción y operación del proyecto.
3. Desarrollar listas de chequeo preliminares para la fase de construcción.
4. Actualizar el alcance y el formato del manual de operación y mantenimiento de los sistemas del proyecto.
5. Definir los requisitos de capacitación para el personal de operación y mantenimiento de los sistemas que hacen parte del proyecto.
6. Realizar una revisión de diseño centrada en la VTE.
7. Aprobar las actividades de la VTE a ejecutar en la fase de diseño.

4) *Validación técnica de la edificación para la construcción*

Durante la fase de construcción del proyecto, los sistemas se instalan, inspeccionan, prueban y ponen en servicio para cumplir con los requisitos del OPR. Esta fase también puede incluir actividades de licitación, negociación y contratación. Durante esta fase también se entrega el manual de operación y mantenimiento del sistema y se realiza la capacitación al personal de operación y mantenimiento que estará a cargo de los sistemas instalados.

Las actividades de la Validación Técnica de la Edificación (VTE) en la fase de construcción deben ser realizadas por el equipo de diseño en conjunto con consultores especialistas para cada disciplina técnica que requiera el proyecto. El alcance de los servicios contratados con estos consultores deberá cubrir el acompañamiento a la Autoridad de VTE (AVTE) del proyecto en las fases de prediseño, diseño y construcción.

Este acompañamiento puede incluir actividades relacionadas con pruebas de materiales, proceso de ajuste y balanceo de sistemas, pruebas de eficiencia y desempeño, registros de datos, fotografía de los sistemas instalados, capacitación por parte de fabricantes y proveedores y otros requisitos que surjan durante la fase de construcción. Los objetivos de la VTE en la fase de construcción incluyen:

1. Actualizar el OPR.
2. Actualizar del plan de VTE.
3. Verificar que las fichas técnicas de los sistemas a instalar cumplen con el OPR.
4. Desarrollar los procedimientos de puesta en marcha detallados y formatos de toma de datos en operación de los sistemas instalados.
5. Verificar que los sistemas instalados cumplen con el OPR.
6. Entregar manual de operación y mantenimiento de los sistemas instalados.
7. Verificar que se realice la capacitación del personal de operación y mantenimiento según lo establecido en el OPR.
8. Aprobar las actividades de la VTE a ejecutar en la fase de construcción.

5) *Validación técnica de la edificación para la operación*

Las actividades de la Validación Técnica de la Edificación (VTE) que inician en esta fase y que deben continuar hasta el final del período de garantía contractual e idealmente continuar durante toda la vida útil de la instalación, se denominan actividades de “*recommissioning*”. Durante la fase de operación del proyecto se debe verificar que la puesta en marcha, el mantenimiento, modificaciones a los sistemas instalados y su documentación asociada estén acordes con lo requerido en el OPR. Los objetivos de la VTE en la fase de operación incluyen:

1. Usar el conocimiento y la experiencia de la Autoridad de VTE (AVTE) contratada para el proyecto para minimizar los llamados por garantías hacia los contratistas.
2. Brindar orientación permanente sobre la operación y mantenimiento de los sistemas de climatización instalados para cumplir con el OPR.
3. Realizar pruebas y ajustes periódicos a los sistemas instalados para cumplir con el OPR.
4. Documentar las lecciones aprendidas durante la aplicación del proceso de VTE para su aplicación en proyectos futuros.
5. Aprobar las actividades de la VTE a llevarse a cabo durante la fase de operación del proyecto.

Si el propietario del proyecto adopta la VTE en la fase de operación del proyecto para una edificación o sistema que nunca antes ha sido sometido a un proceso de VTE, entonces este proceso se denomina “*retrocommissioning*” o “revalidación técnica de la edificación” y, si bien realiza

algunas de las actividades de la VTE mencionadas anteriormente, es muy diferente del alcance descrito hasta ahora.

V. METODOLOGÍA

La estructura metodológica para desarrollar la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle a partir del caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería se muestra en la Fig. 24. La TABLA III muestra como la metodología está orientada a satisfacer el objetivo general a través del desarrollo de diferentes temas y uso de recursos necesarios.

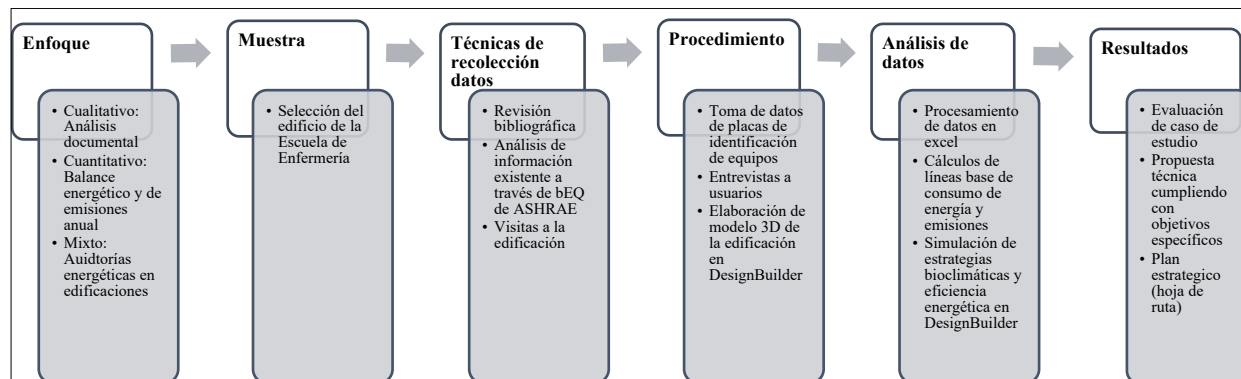


Fig. 24 Estructura metodológica para desarrollar la hoja de ruta Edificaciones Cero Emisiones de la Universidad del Valle

A. Enfoque

Para cumplir con el objetivo principal de desarrollar la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle, se utilizó una metodología integral que combinó enfoques cualitativos, cuantitativos y mixtos. Estos enfoques se aplicaron de manera conjunta para llevar a cabo las actividades de análisis documental y levantamiento de datos en campo.

En primer lugar, se empleó un enfoque cualitativo exhaustivo, el cual consistió en la identificación y selección de guías, estándares, normas, libros y artículos científicos relevantes. Estas fuentes proporcionaron una perspectiva y conocimientos sobre temas clave como Edificaciones Neto Cero (ENC), Edificaciones Cero Energía (ECE), Diseño Pasivo de Edificaciones, Proceso de Commissioning, Energías Renovables y Hojas de Ruta. Mediante un análisis detallado de esta información, se logró comprender y estructurar un proceso lógico que abarcó todas las etapas, desde la conceptualización y diseño hasta la construcción y la operación de las edificaciones, con el objetivo de alcanzar el objetivo de ENC.

TABLA III METODOLOGÍA ASOCIADA A SATISFACER EL OBJETIVO GENERAL

Objetivo General	Objetivos Específicos	Temarios	Recursos Necesarios	Metodología			
				Método de Investigación	Tipo de Investigación	Diseño de Investigación	Enfoque
Desarrollar la hoja de ruta Edificaciones Cero Emisiones de la Universidad del Valle a partir del caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería	(DISEÑO) 1.0 Formular las etapas de diseño de edificaciones nuevas o en rehabilitación con base estrategias bioclimáticas y el proceso de Commissioning	1.1 Guía para definir los requisitos del propietario (OPR) para el diseño de edificaciones nuevas o en rehabilitación	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de Commissioning 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		1.2 Guía para desarrollar un Plan de Commissioning que evalúe y documente que el diseño, construcción y operación de edificaciones nuevas y en rehabilitación satisface el OPR	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de Commissioning 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		1.3 Guía para definir las bases para el diseño (BoD) de edificaciones nuevas o en rehabilitación	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de Commissioning 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		1.4 Estrategias de diseño pasivo de edificios para disminuir el uso de energía eléctrica y generación de emisiones	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de diseño pasivo y bioclimática 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet 5. Software de modelado BIM y simulación	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		1.5 Energías renovables para uso en edificaciones nuevas y en rehabilitación	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de cálculo y selección de energías renovables 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet 5. Software de modelado BIM y simulación	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		1.6 Guía para selección de sistemas de climatización e iluminación para edificaciones nuevas y en rehabilitación	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de cálculo y selección de sistemas de climatización e iluminación 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet 5. Software de modelado BIM y simulación	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
	(CONSTRUCCIÓN) 2.0 Formular la metodología para disminuir las emisiones de CO ₂ para la etapa de construcción de edificaciones en la Universidad del Valle a partir del concepto de Edificios Neto Cero y el proceso de Commissioning	2.1 Actividades de Commissioning a llevar a cabo en la etapa de construcción de edificaciones nuevas y en rehabilitación para cumplir con OPR y BoD	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de Commissioning 3. Guías de construcción sostenible de edificaciones 4. Computador e internet	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		2.2 Guía para uso y aprovechamiento de materiales para la etapa de construcción de edificaciones nuevas y en rehabilitación con base en criterios de economía circular	1. Guías de economía circular para uso y aprovechamiento de materiales de construcción 2. Guías de construcción sostenible de edificaciones 3. Computador e internet	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		2.3 Guía de buenas prácticas de construcción orientadas a disminuir el uso de energía eléctrica y generación de emisiones	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de construcción sostenible de edificaciones 3. Computador e internet	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
	(OPERACIÓN Y MTTO) 3.0 Formular la metodología para disminuir el uso de electricidad en la operación de edificaciones en la Universidad del Valle a partir del concepto de Edificios Cero Energía y el proceso de Commissioning -Caso de Estudio-	3.1 Línea base de consumo de energía y emisiones de CO ₂ del edificio Escuela de Enfermería según programa bEQ de ASHRAE y establecimiento de metas	1. Estándares y guías ASHRAE para auditorías energéticas 2. Computador e internet 3. Papelería 4. Permisos para ingreso a edificios 5. Planos de edificios	Empírico estudio de caso	Explicativo	De campo	Mixto
		3.2 Estrategias de eficiencia energética y diseño pasivo en edificaciones nuevas y en rehabilitación para la Universidad del Valle	1. Estándares y guías para cálculo de emisiones 2. Plantillas de excel 3. Computador e internet 4. Planos de edificios	Empírico estudio de caso	Explicativo	De campo	Mixto
			1. Estándares y guías de eficiencia energética 2. Estándares y guías para operación y mantenimiento 3. Computador e internet 4. Planos de edificios	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		3.3 Lineamientos de operación y mantenimiento de edificios orientados a tener alta calidad ambiental interior y alta eficiencia energética en la Universidad del Valle	1. Estándares y guías de diseño pasivo de edificios 2. Archivos climáticos 3. Software de simulación de edificios 4. Computador e internet 5. Planos de edificios	Lógico inductivo	Descriptivo	Documental	Cuantitativo
			1. Estándares y guías para cálculo de emisiones 2. Plantillas de excel 3. Computador e internet	Lógico inductivo	Descriptivo	Documental	Cuantitativo
		3.4 Actividades de Commissioning para la etapa de operación de edificios para cumplir OPR y BoD	1. Estándares ASHRAE 2. Guías de Commissioning 3. Guías de operación y mantenimiento de sistemas de climatización, refrigeración e iluminación 4. Computador e internet 5. Reglamentación local	Lógico deductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo
		3.5 (Hoja de Ruta) Consolidar el plan de reducción de consumo de energía y emisiones de las edificaciones de la Universidad del Valle para 2030 y 2050	1. Hoja de ruta nacional edificaciones neto cero carbono 2022 2. Guías para desarrollo de hojas de ruta de la IEA 3. Guías proyecto CEELA 4. Talleres proyecto CEELA 5. Talleres con expertos	Lógico inductivo	Descriptivo	Documental	Cualitativo

Adicionalmente, se implementó un enfoque cuantitativo específico para obtener un análisis detallado de la edificación en estudio centrando su enfoque en la recopilación de datos numéricos relevantes sobre el consumo de energía destinada a la operación de la edificación. A partir de estos datos, se calcularon las emisiones de CO_{2e} asociadas. Este enfoque cuantitativo permitió obtener resultados concretos que respaldaron una comprensión y evaluación objetiva de las edificaciones

en relación con los objetivos de ECE. Es importante destacar que el enfoque cuantitativo se limitó exclusivamente a la recopilación y análisis de datos numéricos en la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), sin abordar otros aspectos más subjetivos o cualitativos. No obstante, esta metodología proporcionó una base para cuantificar y evaluar de manera general el rendimiento energético de la EEU, así como determinar su grado de eficiencia y sostenibilidad.

En conjunto, la combinación de estos enfoques cualitativos, cuantitativos y mixtos permitió desarrollar una hoja de ruta integral y basada en evidencias que proporcionó un marco representativo para la toma de decisiones y la implementación de medidas concretas destinadas a alcanzar los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética en Univalle.

B. Muestra

En colaboración con la Oficina de Infraestructura de Univalle se realizó la selección de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) la cual sería objeto de estudio con el fin de obtener los datos necesarios para establecer las líneas base de consumo de energía eléctrica y emisiones anuales de CO_{2e} asociadas a su operación. Esta edificación cumplía con un requisito fundamental para llevar a cabo tanto la auditoría energética preliminar (PEA, por sus siglas en inglés) como la auditoría energética de nivel I, siguiendo las pautas establecidas en la guía “*Procedures for Commercial Building Energy Audits*” de ASHRAE²² [26]. Dichos requisitos incluyen la disponibilidad de medidores de energía independientes y recibos de servicios públicos independientes durante al menos un año.

Adicionalmente, el uso de esta edificación incluye aulas de clase, auditorios y oficinas que permiten caracterizar de manera adecuada el uso típico de las edificaciones de Univalle. Esta consideración amplía aún más la representatividad de la muestra seleccionada y proporciona una visión integral del consumo de energía y las emisiones de CO_{2e} en diversos espacios dentro de la universidad.

C. Técnicas para recolección datos

²² American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

Las técnicas utilizadas para recopilar datos en campo fueron diversas y se llevaron a cabo de manera sistemática. En primer lugar, se realizó un análisis exhaustivo de los planos arquitectónicos de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU). Este análisis permitió obtener información detallada sobre la distribución espacial de los diferentes espacios y la ubicación de los elementos que generan consumo de energía eléctrica, como los equipos de aire acondicionado, los equipos de cómputo y la iluminación.

Posteriormente, se realizaron visitas a la EEU donde se recorrieron las distintas áreas y zonas evaluadas con el objetivo de identificar de manera precisa y detallada los elementos y equipos que generan consumo de energía eléctrica. Se registraron y anotaron los datos relevantes, como la marca y modelo de los equipos, su capacidad, horarios de funcionamiento y cualquier otro parámetro relevante para el análisis.

D. Procedimiento

Durante el trabajo de campo, se implementaron procedimientos detallados para recopilar datos precisos para verificar la potencia eléctrica consumida por cada elemento donde se tuvo en cuenta la información proporcionada en las placas de identificación, considerando tanto la cantidad de elementos presentes como su ubicación actual en las edificaciones. Estos datos se registraron de manera organizada en formatos de Excel especialmente diseñados para este propósito los cuales se complementaron con registros fotográficos generales para respaldar visualmente la información recopilada.

Además de la recopilación de datos técnicos, durante las visitas se llevó a cabo un proceso de consulta directa con los usuarios de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU). Estas consultas estuvieron enfocadas en obtener información relevante sobre los horarios de ocupación y el uso específico de cada zona dentro de la EEU. Los usuarios proporcionaron detalles sobre las actividades realizadas en cada área, los horarios de funcionamiento de los equipos y cualquier otro aspecto que pudiera influir en el consumo de energía eléctrica.

La combinación de datos técnicos y la retroalimentación de los usuarios proporcionaron una visión completa y detallada del consumo de energía eléctrica en la EEU, respaldando así un análisis más completo y exhaustivo.

E. Análisis de datos

Después de recopilar y procesar los datos obtenidos en campo, se llevó a cabo un análisis completo con el objetivo de definir las medidas de eficiencia energética, las estrategias de diseño pasivo en edificaciones y el uso de energías renovables que se adaptaban de manera óptima a las condiciones climáticas, ambientales y de uso específicas de la Escuela de Enfermería (EEU). El propósito principal era reducir tanto el consumo de energía eléctrica como las emisiones de CO_{2e} asociadas a la operación de esta edificación.

Posteriormente, se procedió a simular estas medidas y estrategias utilizando software especializado en simulación energética de edificaciones. Esto permitió evaluar, bajo condiciones simuladas, si el consumo de energía eléctrica y las emisiones de CO_{2e} cumplían con los objetivos establecidos para lograr las metas de Edificaciones Neto Cero (ENC) y Edificaciones Cero Energía (ECE). Mediante estas simulaciones, se pudo analizar el impacto de las medidas propuestas y realizar ajustes cuando fue necesario, con el fin de optimizar el rendimiento energético de la edificación y asegurar el cumplimiento de los objetivos de eficiencia y sostenibilidad establecidos.

VI. CASO DE ESTUDIO

Este caso de estudio se centra en el edificio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), ubicado en la sede de San Fernando en Cali, seleccionado por su configuración que incluye aulas académicas y oficinas administrativas y por contar con un contador de energía independiente. Esta característica permite el acceso a facturas de servicios públicos específicas que facilitan la realización de una Auditoría Energética Preliminar (PEA) según los estándares de bEQ de ASHRAE para evaluar el consumo de energía y establecer líneas base de consumo energético y emisiones de CO_{2e}.

El objetivo de este capítulo es construir un diagnóstico energético inicial y verificar el cumplimiento de las metas de reducción hacia 2030 y 2040, basadas en los principios de Edificaciones Cero Energía (ECE) y adaptadas al clima de Cali. Mediante simulaciones en DesignBuilder, se evaluarán intervenciones arquitectónicas de diseño pasivo destinadas a mejorar la iluminación natural y reducir la carga térmica, así como el impacto de Medidas de Eficiencia Energética (MEE) tales como la implementación de iluminación LED, la actualización de equipos de climatización a modelos más eficientes y el aislamiento térmico del techo. Aunque se considerarán energías renovables como la instalación de paneles fotovoltaicos, no se simularán directamente en DesignBuilder; en su lugar, se realizarán cálculos generales para evaluar su impacto en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO_{2e}.

Estos cálculos teóricos y simulaciones no solo buscan demostrar la viabilidad técnica y ambiental de las estrategias propuestas, sino también establecer un modelo replicable para otras edificaciones del campus que contribuya a la sostenibilidad institucional y a los compromisos globales de descarbonización, incluyendo los propuestos en la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle.

A. Localización y características funcionales

El edificio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) está ubicado al suroeste del perímetro urbano de Cali en un terreno a 987 metros sobre el nivel del mar. La orientación de la fachada norte, con un ángulo de 13° hacia el este, y la disposición general de la EEU favorecen la ventilación natural y las condiciones de confort térmico. Además, la presencia de árboles frondosos

de entre 10 y 15 metros de altura proporcionan sombra significativa en las fachadas oeste, este y sur, lo que reduce las ganancias térmicas por radiación solar directa. Sin embargo, esta vegetación limita la iluminación natural especialmente en las áreas interiores lo que genera una dependencia considerable de la iluminación artificial. No obstante, en su interior, la plazoleta central mejora la iluminación natural en los corredores del primer y segundo piso, aunque enfrenta problemáticas de reflectividad durante las horas soleadas o al mediodía cuando la intensidad de la luz solar puede causar reflejos excesivos y un aumento en la carga térmica, afectando el confort térmico y la eficiencia energética de la edificación.

Las ventanas hacia el exterior tienen elementos arquitectónicos verticales para control solar fundidos en concreto que ayudan a mitigar el impacto del sol directo, además de contar con algunas aberturas verticales esbeltas que inicialmente fueron diseñadas para la ventilación natural pero que actualmente están selladas con vidrios, limitando este uso y beneficio.

El análisis de incidencia y trayectoria solar muestra que las fachadas noreste y sureste están expuestas a la radiación solar durante las mañanas de los solsticios de junio y diciembre, mientras que la fachada noreste recibe mayor exposición en las tardes. En el equinoccio, las sombras son equilibradas, pero gran parte del techo permanece expuesto a la radiación solar directa lo que incrementa las ganancias de calor y, al mismo tiempo, ofrece la oportunidad para la instalación de paneles solares fotovoltaicos.

La EEU fue diseñada para funciones académicas y administrativas del programa de enfermería y actualmente enfrenta problemáticas relacionadas con sistemas de climatización e iluminación obsoletos que elevan el consumo energético y reducen la Calidad Ambiental Interior (IEQ), convirtiéndolo en un caso ideal para analizar e implementar estrategias de eficiencia energética y sostenibilidad.

Además, la edificación cuenta con una estructura de muros de carga que no exhibe pórticos de concreto (columnas y vigas) ni estructuras metálicas a simple vista. Según los planos, la edificación tiene áreas con cubierta plana maciza de 0.30 m de espesor en concreto, y otras con cubierta a cuatro aguas de 0.15 m de espesor también en concreto. Las losas de entrepiso son macizas y tienen un espesor de 0.40 m en concreto. En cuanto a los acabados, los muros presentan una combinación de ladrillo a la vista de tonalidad roja y obra blanca compuesta de estuco y pintura. Los pisos varían entre cerámica y concreto pulido mientras que los cielos falsos están acabados con láminas de yeso.

La Figura 25 muestra un collage de fotos de la EEU que ilustra estas características arquitectónicas y el entorno de la edificación.



Fig. 25 Fotos de la Escuela de Enfermería de Univalle

B. Partes involucradas

La Oficina de Infraestructura de Univalle proporcionó recursos esenciales como planos arquitectónicos y facturas de servicios públicos que permitieron analizar el consumo energético y realizar auditorías energéticas bajo el marco de ASHRAE bEQ. Además, la colaboración de la dirección de la EEU fue fundamental para el levantamiento de datos en campo y la identificación de oportunidades de mejora en la edificación.

Adicionalmente, la participación en el proyecto CEELA proporcionó metodologías y talleres que guiaron el proceso de diagnóstico, levantamiento de datos y validación de estrategias para la EEU con base en la estructura propuesta por la representante de la Agencia Internacional de Energía (IEA). CEELA no solo contribuyó con conocimientos técnicos y metodológicos sino que también fomentó la participación interdisciplinaria al facilitar la integración de otros actores como expertos en sostenibilidad y diseño bioclimático de otras universidades.

C. *Recolección de datos*

Para evaluar efectivamente el consumo energético y las características físicas de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), fue relevante obtener información detallada desde la Oficina de Infraestructura de Univalle. Atendiendo nuestra solicitud, se obtuvieron planos arquitectónicos y facturas de servicios públicos de 2022 que brindaron detalles importantes sobre la estructura, el diseño de la edificación y el consumo histórico de energía. Estos documentos fueron fundamentales para calcular indicadores como el consumo total de energía, patrones de uso y costos asociados, permitiendo establecer las líneas base de consumo energético y emisiones de CO_{2e}, y comparar el desempeño energético antes y después de las intervenciones propuestas.

Además, se realizaron tres visitas a la EEU para observar y registrar las condiciones de operación y uso. Durante estas visitas, se emplearon los formatos del archivo de Excel “*Preliminary Energy-Use Analysis*” de la guía “*Procedures for Commercial Building Energy Audits*” [26] de ASHRAE para documentar detalladamente áreas específicas y su funcionalidad, dimensiones, horarios de operación, número de ocupantes y detalles de los equipos eléctricos como computadoras, impresoras, luminarias y sistemas de climatización (véase anexo II). Registrar los datos sobre la potencia, el consumo teórico y la cantidad de equipos fue fundamental para la posterior evaluación energética y para el desarrollo de las estrategias de diseño pasivo y Medidas de Eficiencia Energética (MEE) a implementar.

D. *Análisis de datos*

Tras la recolección de información en campo, se procedió con el registro en los formatos de Excel de ASHRAE (véase apéndice III) de los datos de demanda eléctrica en kW, el consumo en kWh y el costo en pesos por kWh de las facturas de servicios públicos de la EEU. Estos datos son necesarios para realizar una evaluación energética inicial y establecer las líneas base de consumo de energía de la EEU expresadas en los indicadores energéticos como el Índice de Uso de Energía (EUI) y el Índice de Costo de Energía (ECI). Además, se estimaron las emisiones totales en tCO_{2e}, generando una visión completa del impacto ambiental y energético actual de la EEU.

Este análisis no solo ayudó a cuantificar y entender el consumo y costos energéticos actuales sino que también estableció un marco para evaluar el potencial de las mejoras propuestas para reducir el consumo energético y reducir las emisiones de CO_{2e}.

E. Evaluación comparativa “benchmarking”

Utilizando el EUI calculado, se realizó un “*benchmarking*” para evaluar el rendimiento energético de la EEU donde se comparó el EUI con estándares reconocidos como la Resolución 0549 de 2015 de Colombia, los criterios de “*Energy Star*” y las normativas de la “*Building and Construction Authority of Singapore*”. Este análisis permitió comparar el desempeño de la EEU en relación con otras edificaciones de uso académico y universitario a nivel local e internacional. Sin embargo, es importante resaltar que las comparaciones con referencias internacionales, especialmente aquellas de regiones como Estados Unidos, pueden ser menos prácticas debido a diferencias significativas en las condiciones de operación de las edificaciones. En Estados Unidos, por ejemplo, se considera casi permanente el uso de sistemas de enfriamiento y calefacción a lo largo del año, una necesidad que no se presenta en el clima más cálido y constante de Cali. Esta discrepancia subraya la importancia de contextualizar los “*benchmarks*” internacionales y adaptarlos a las condiciones climáticas y operativas locales para asegurar una evaluación más precisa y relevante. Por ello, también se incluyen referencias locales como la Resolución 0549, la cual proporciona unos valores más ajustados a las condiciones climáticas y de operación en Colombia y que facilitan una comparación más relevante y aplicable.

F. Propuestas de mejora y simulaciones

Con base en los resultados del análisis y benchmarking, se han diseñado varias propuestas para mejorar la eficiencia energética y la Calidad Ambiental Interior (IEQ) de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU). Estas mejoras se centran en optimizar la iluminación natural, reducir la carga térmica mediante ajustes arquitectónicos y modernizar los sistemas de climatización para incorporar tecnologías más eficientes y ecológicas. Los escenarios propuestos para las simulaciones en DesignBuilder fueron:

1. **Caso base para simulación:** Refleja el estado actual de la edificación en cuanto a carga térmica demanda e iluminación natural utilizando datos reales obtenidos de la PEA sobre ocupación, equipos, iluminación y horarios, proporcionando un punto de referencia para las mejoras propuestas.
2. **Escenario mejorado con diseño pasivo:** Incluye modificaciones como la instalación de aleros y cortasoles, así como la apertura de tragaluces para mejorar la iluminación natural sin incrementar la carga térmica.
3. **Escenario mejorado con diseño pasivo más Medidas de Eficiencia Energética (MEE):** Incorpora la sustitución de la iluminación fluorescente actual por sistemas LED, aislamiento térmico en áreas seleccionadas del techo, uso de vidrios de alto rendimiento para minimizar la carga térmica y la sustitución de equipos de climatización por modelos de mayor eficiencia y refrigerantes ecológicos.
4. **Integración total de diseño pasivo, MEE y Energías Renovables:** Este escenario suma a las mejoras anteriores la instalación de paneles fotovoltaicos para cubrir las necesidades residuales de iluminación artificial, maximizando la sostenibilidad de la edificación y acercándose a los estándares de una Edificación Neto Cero (ENC).

Las simulaciones en DesignBuilder han permitido visualizar los cambios en la carga térmica y las mejoras en la IEQ para cada escenario. Estas simulaciones aportaron datos cuantitativos sobre el impacto de las intervenciones propuestas en el consumo de energía y las emisiones de CO_{2e} del edificación. Se demostró que las modificaciones no solo son efectivas sino también coste-eficientes, facilitando la planificación y la toma de decisiones para alcanzar los objetivos de ENC.

G. Análisis y resultados

1) Líneas base de consumo de energía y emisiones de CO_{2e}

Este apartado expone los resultados del análisis energético realizado para la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), centrado especialmente en el Índice de Uso de Energía (EUI) y las emisiones de CO_{2e}, ambos clave para evaluar el estado actual de la edificación antes de la implementación de las mejoras propuestas.

a) Cálculo del Índice de Uso de Energía (EUI)

El EUI se calculó basándose en el consumo total anual de energía eléctrica de la edificación ajustado al área total evaluada de la EEU y expresado en kWh/m²-año. Para obtener este valor, se utilizó la información recogida a través de la Auditoría Energética Preliminar (PEA) y los datos de consumo obtenidos de las facturas de servicios públicos del año 2022 (véase apéndices II y III). Este indicador es crucial para determinar la eficiencia energética actual de la EEU y obtener una línea base para futuras intervenciones de mejora. La Fig. 26 muestra un EUI actual de **39.4 kWh/m²-año** que se compara de la siguiente manera con las referencias locales e internacionales para edificaciones de uso académico universitario:

- Es un 45.3% menor que el EUI de referencia nacional para climas cálidos secos (72 kWh/m²-año) y 32.2% mayor para climas cálidos húmedos (29.8 kWh/m²-año).
- Comparado con la referencia internacional de “*Energy Star*” (133.9 kWh/m²-año), es un 70.5% menor.
- Es un 60.2% menor que el estándar de excelencia de la “*Building and Construction Authority of Singapore*” (99 kWh/m²-año).

Estos resultados reflejan el estado actual de la EEU y demuestran cómo el diseño original de la edificación, integrando medidas de diseño pasivo como los elementos de control solar verticales en las ventanas, corredores internos que funcionan como aleros y la vegetación circundante, contribuye a reducir la demanda energética requerida para el uso de sistemas de climatización dadas las condiciones climáticas de Cali.

b) Emisiones de CO_{2e}

Las emisiones de CO_{2e} fueron calculadas utilizando el EUI y aplicando factores de conversión específicos que consideran la fuente de energía y la eficiencia de la red eléctrica nacional. Los resultados mostrados en la Fig. 26, de **7.7 tCO_{2e}-año (en sitio)** y **24.9 tCO_{2e}-año (en la fuente)**, representan el impacto ambiental directo del consumo de energía de la EEU y resaltan la importancia de estas mediciones como indicadores críticos para las estrategias de reducción de emisiones que se proponen en esta tesis.

Por otra parte, para estimar las emisiones de CO_{2e} derivadas del uso de refrigerantes en los sistemas de climatización la EEU se tuvo en cuenta que los sistemas actualmente instalados utilizan el refrigerante R-410A. Este refrigerante tiene un Potencial de Calentamiento Global (GWP) de 1,920 kg de CO_{2e} por kg de refrigerante liberado a la atmósfera (véase apéndice I). La capacidad total de los sistemas de climatización instalados es de 56.3 toneladas de refrigeración (TR) y estimando que el contenido promedio de refrigerante por tonelada es de aproximadamente 1.0 kg/TR (incluyendo equipo y tuberías), se tendrían aproximadamente un total de 56.3 kg de refrigerante en los sistemas de climatización. Ahora, considerando una tasa de fuga anual del 5%, típica en sistemas bien mantenidos, se estima una liberación anual de aproximadamente 2.8 kg de R-410A. Esto resulta en emisiones anuales de **5.4 tCO_{2e}**, lo que muestra la importancia de mantener sistemas de refrigeración eficientes y sin fugas para minimizar su impacto ambiental.

Finalmente, las emisiones totales de CO_{2e} en sitio equivalen a **13.1 tCO_{2e}** de las cuales aproximadamente el 59% corresponden al uso de energía eléctrica y el restante 41% al uso de refrigerantes en sistemas de climatización.

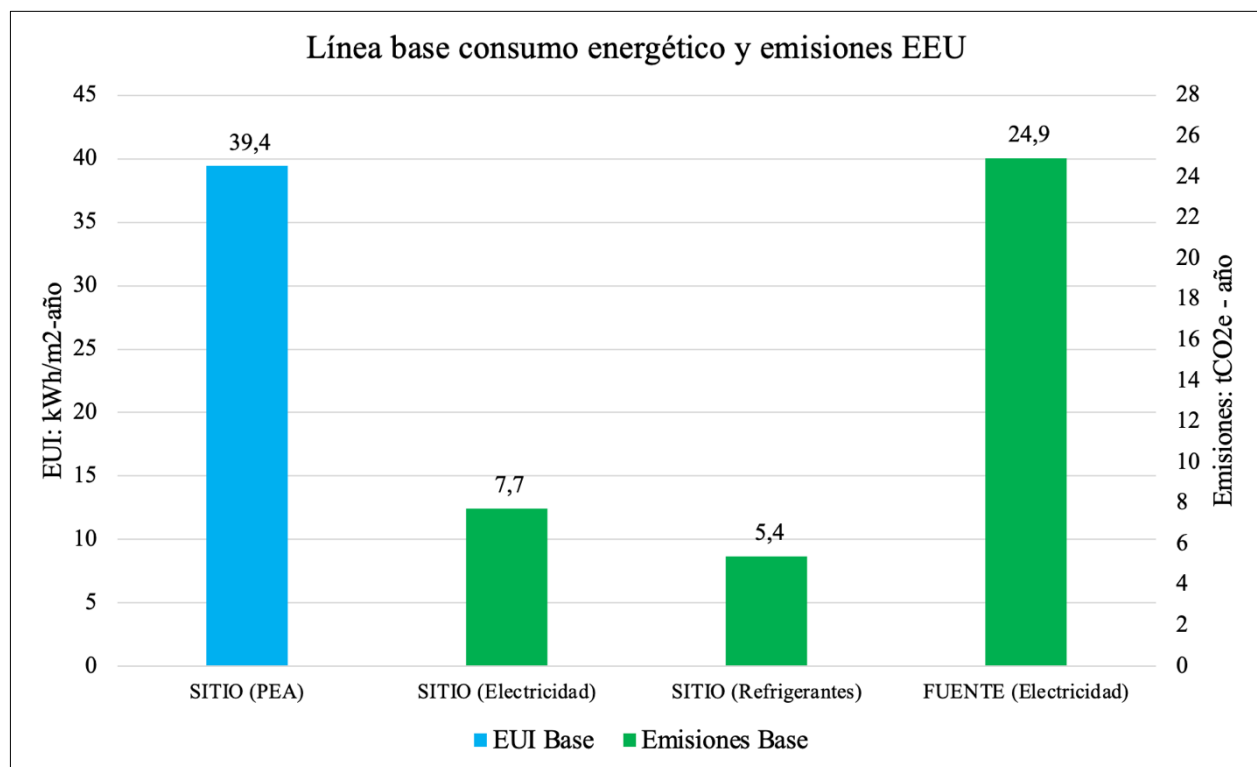


Fig. 26 Líneas base de consumo energético (kWh/m²-año) y emisiones (tCO_{2e}-año) para Escuela de Enfermería Univalle (EEU) 2022

2) Validación de la Auditoría Energética Preliminar (PEA)

Durante la Auditoría Energética Preliminar (PEA) de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), se recopiló información detallada sobre el uso de energía, incluyendo horarios de operación, características técnicas de los equipos y ocupación. A partir de estos datos, se estimó un consumo energético anual de **61,425 kWh**. Al comparar esta cifra con los 60,000 kWh registrados en las facturas de servicios públicos, encontramos una coincidencia cercana que valida la precisión de los métodos utilizados en la PEA. La pequeña diferencia de aproximadamente 2.4% puede atribuirse a variaciones menores en el uso real o inexactitudes en las suposiciones hechas sobre la eficiencia de los equipos. Sin embargo, la cercanía entre los valores calculados y los consumos registrados confirma la efectividad de la metodología empleada y muestra que las estimaciones reflejan con precisión el consumo real de energía de la PEA.

3) Desagregación del uso de la energía

La Fig. 27 muestra el consumo de energía eléctrica en la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) y resalta que los sistemas de climatización son el principal consumidor con un 60% del total, lo que refleja las altas demandas térmicas de climas como el de Cali y subraya la importancia de optimizar o actualizar estos sistemas para mejorar su eficiencia. Los computadores de oficina y de las aulas de clase siguen con un 22% del consumo, evidenciando el uso intensivo de estos en actividades académicas y administrativas, mientras que la iluminación representa un 13%. Este porcentaje sugiere oportunidades para incrementar el uso de luz natural o mejorar la eficiencia de los sistemas de iluminación artificial actuales. Los otros equipos y cargas componen el 5% restante, incluyendo dispositivos típicos para las operaciones diarias de la edificación.

Esta desagregación específica permite identificar áreas prioritarias para intervenciones energéticas como por ejemplo, priorizar la optimización del sistema de aire acondicionado lo cual podría reducir considerablemente el consumo energético total. Asimismo, mejorar la eficiencia en iluminación podría disminuir la dependencia de energía artificial, apoyando un funcionamiento más sostenible de la edificación y mejorando la Calidad Ambiental Interior (IEQ). La importancia de estos datos refleja la eficacia de la metodología empleada en la auditoría energética y proporciona una base sólida para implementar futuras Medidas de Eficiencia Energética (MEE) y sostenibilidad en la EEU.

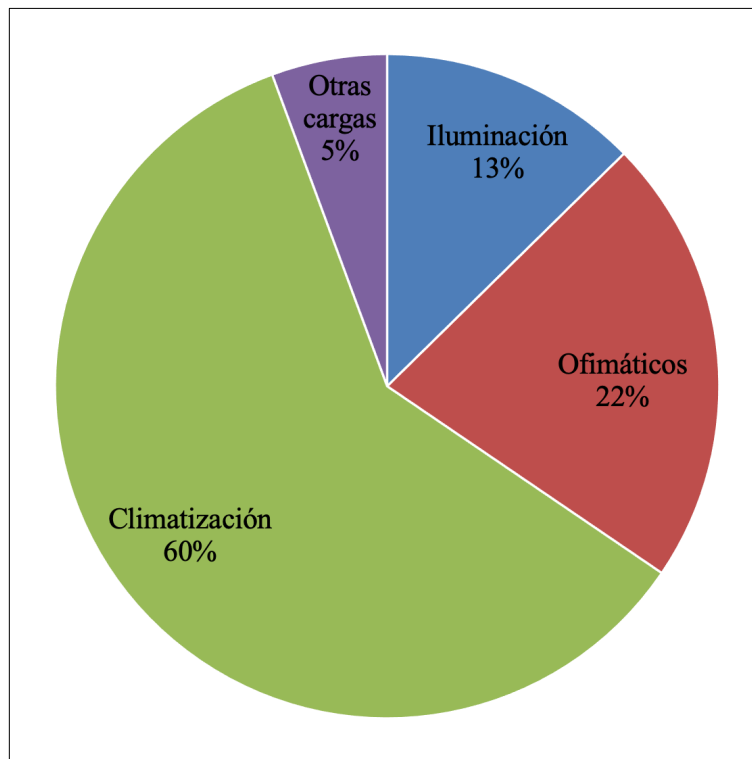


Fig. 27 Desagregación del uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) 2022

4) Metas de reducción de líneas base a 2030 y 2040

Para evaluar el impacto de las intervenciones propuestas en la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), se consideraron metas de reducción para 2030 y 2040 que están alineados con los objetivos nacionales de sostenibilidad para edificaciones existentes [4]. Estas metas cuantifican la reducción esperada en el consumo energético y las emisiones de CO_{2e} a través de los escenarios de mejora simulados.

- **Meta para 2030:** Reducir el consumo energético en al menos un 30% y las emisiones de carbono operacional en un 30% tomando como referencia las líneas base establecidas en 2022. Este objetivo permitirá evaluar la efectividad de las intervenciones iniciales en diseño pasivo y eficiencia energética.
- **Meta para 2040:** Alcanzar una reducción mínima del 70% en el consumo energético y las emisiones de carbono operacional respecto a las líneas base, como parte del esfuerzo hacia la transformación de la EEU en un modelo de sostenibilidad alineado con los principios de Edificaciones Neto Cero (ENC).

Estas metas proporcionan un marco claro para medir el impacto de los escenarios de mejora propuestos y su capacidad para acercar a la EEU al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad a largo plazo. Además, los resultados de las simulaciones realizadas permitirán identificar qué estrategias tienen mayor incidencia en el logro de estas metas permitiendo planificar de manera estratégica las futuras intervenciones.

5) *Estrategias para lograr metas de reducción de líneas base*

a) Caso base para simulación

Antes de abordar los diferentes aspectos relacionados con la simulación, es importante resaltar que el ejercicio de simulación como tal siempre deberá considerarse como un complemento para validar los cálculos analíticos y teóricos propios de la termodinámica, transferencia de calor y mecánica de fluidos, los cuales ejercen como principios rectores para establecer como los medios naturales disponibles y las edificaciones pueden encontrar un balance para lograr un alto desempeño energético y Calidad Ambiental Interior (IEQ).

Este escenario representa el estado actual de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) modelado en DesignBuilder a partir de los datos levantados en la Auditoría Energética Preliminar (PEA). La información incluye ocupación, equipos, iluminación, horarios operativos y materialidades de la edificación las cuales sirven como referencia para las mejoras propuestas. Las Fig. 28 y Fig. 29 representan el modelo tridimensional desarrollado en DesignBuilder que integra todos estos parámetros y proporciona una representación precisa del estado actual de la edificación. El objetivo principal de la simulación es calcular la carga térmica de los espacios actualmente climatizados y evaluar la iluminación natural mediante el Factor de Luz Día (DF) lo que permitirá identificar áreas con alta demanda energética y baja incidencia de luz natural que podrían beneficiarse de intervenciones específicas.

Los resultados de la Fig. 30 generada por el software de simulación indican que la carga térmica pico se obtiene el 01 de mayo a las 3:30 PM con un valor total de **28 TR (98.7 kW)** de los cuales 21.6 TR (76.1 kW) son de calor sensible y las restantes 6.4 TR (22.5 kW) corresponden al calor latente. De esta carga térmica calculada se puede concluir que la capacidad instalada actualmente en la EEU de **56.3 TR (198 kW)** según la PEA realizada (véase apéndice II), excede prácticamente el doble la necesidad real de enfriamiento lo que puede ocasionar que los equipos

trabajen de manera ineficiente y que se tengan áreas subenfriadas generando insatisfacción en cuanto a confort térmico.

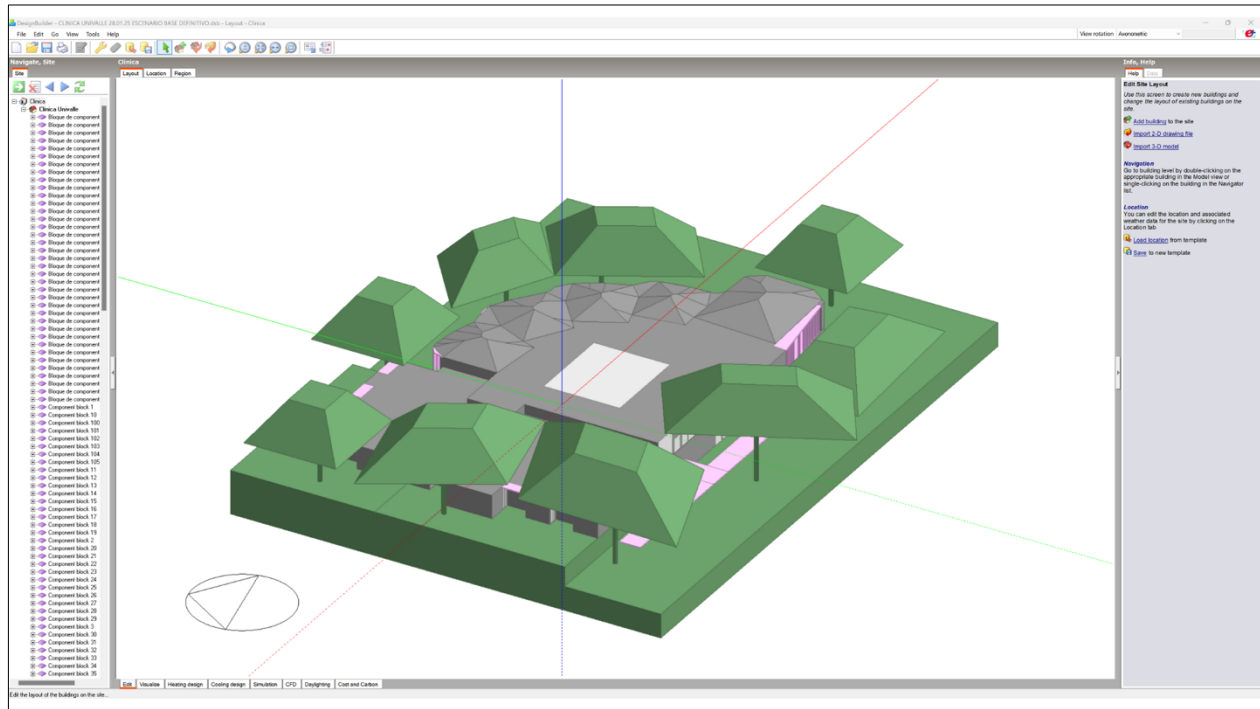


Fig. 28 Modelo 3D Edificio Escuela de Enfermería de Univalle

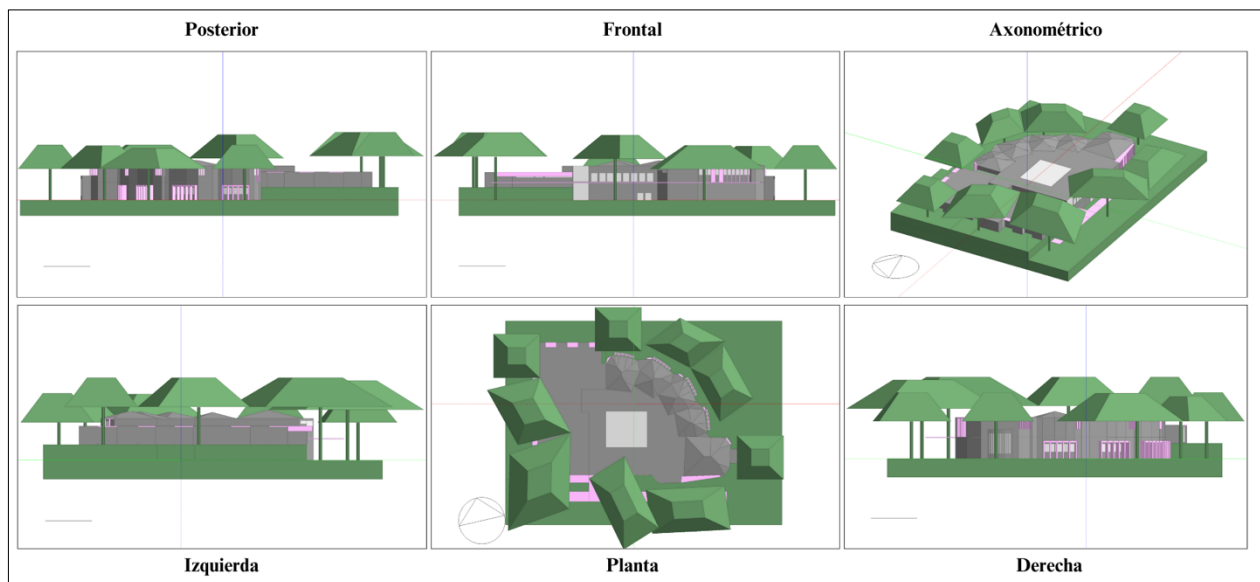


Fig. 29 Vistas del modelo 3D Edificio Escuela de Enfermería de Univalle

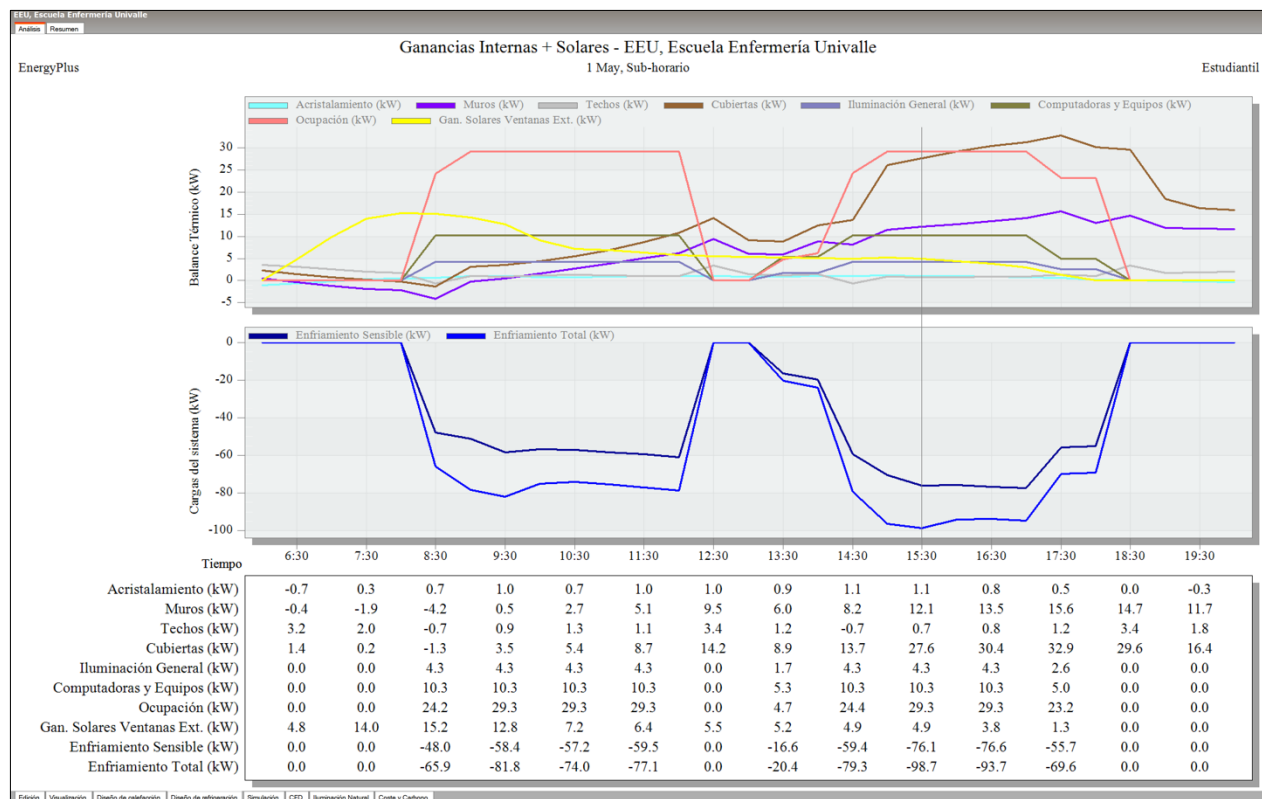


Fig. 30 Carga térmica Edificio Escuela de Enfermería de Univalle

En cuanto a la iluminación natural, las Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33 muestra los valores de DF para la EEU tanto en la zona de oficinas como de aulas académicas en los pisos 1 y 2. En estas imágenes, los colores de tono azul oscuro representan valores cercanos a cero, mientras que los tonos vivos (naranjas y rojos) se aproximan a un DF de 6. Sin embargo, es válido aclarar que en el caso de la zona “Aulas Piso 2” de la Fig. 33 se proyecta el patio central de la edificación que está totalmente expuesto a la luz solar y por eso la escala del DF llega hasta 94 mientras que en los salones prácticamente es cero debido a la incipiente iluminación natural. Aunque estas imágenes nos brindan un panorama general, evidencian que la iluminación natural en la mayoría de los espacios es deficiente o nula. Para ilustrar cómo la implementación de mejoras de diseño pasivo puede transformar las condiciones actuales de iluminación se seleccionaron el Salón 201 de la zona de “Aulas Piso 2” de la Fig. 34 y la Oficina de Recursos Humanos de la zona “Oficinas Piso 1” de la Fig. 35, como ejemplos representativos para analizar su evolución a lo largo de las mejoras propuestas.

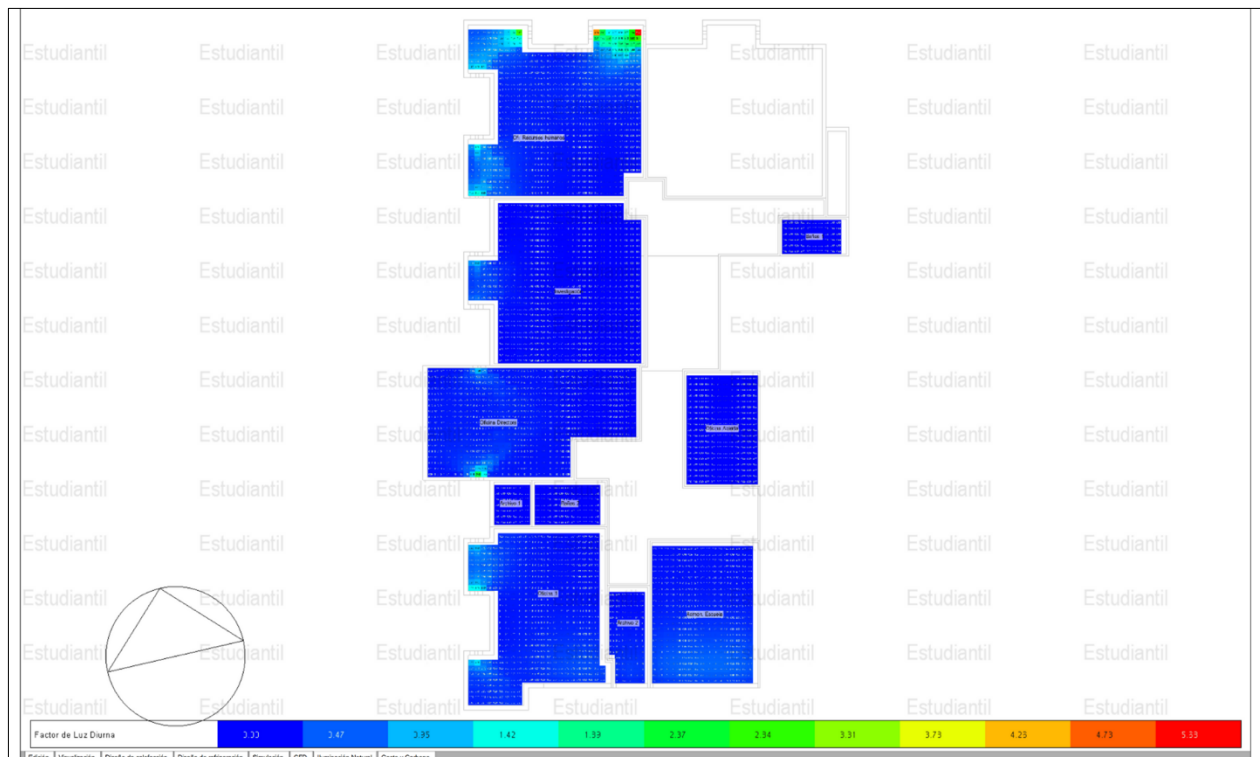


Fig. 31 Simulación de iluminación natural Oficinas Piso 1 Escuela de Enfermería de Univalle (DF 0 - 5.6)

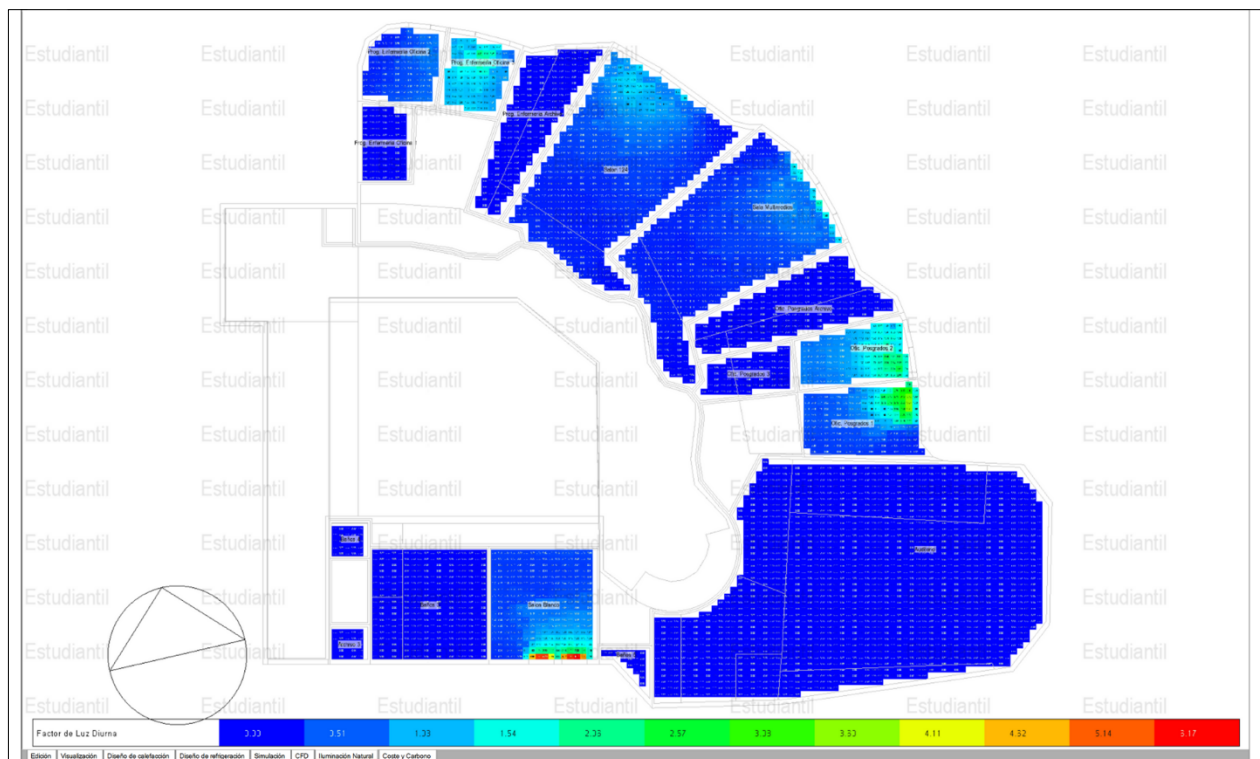


Fig. 32 Simulación de iluminación natural Aulas y Oficinas Piso 1 Escuela de Enfermería de Univalle (DF 0 - 6.1)

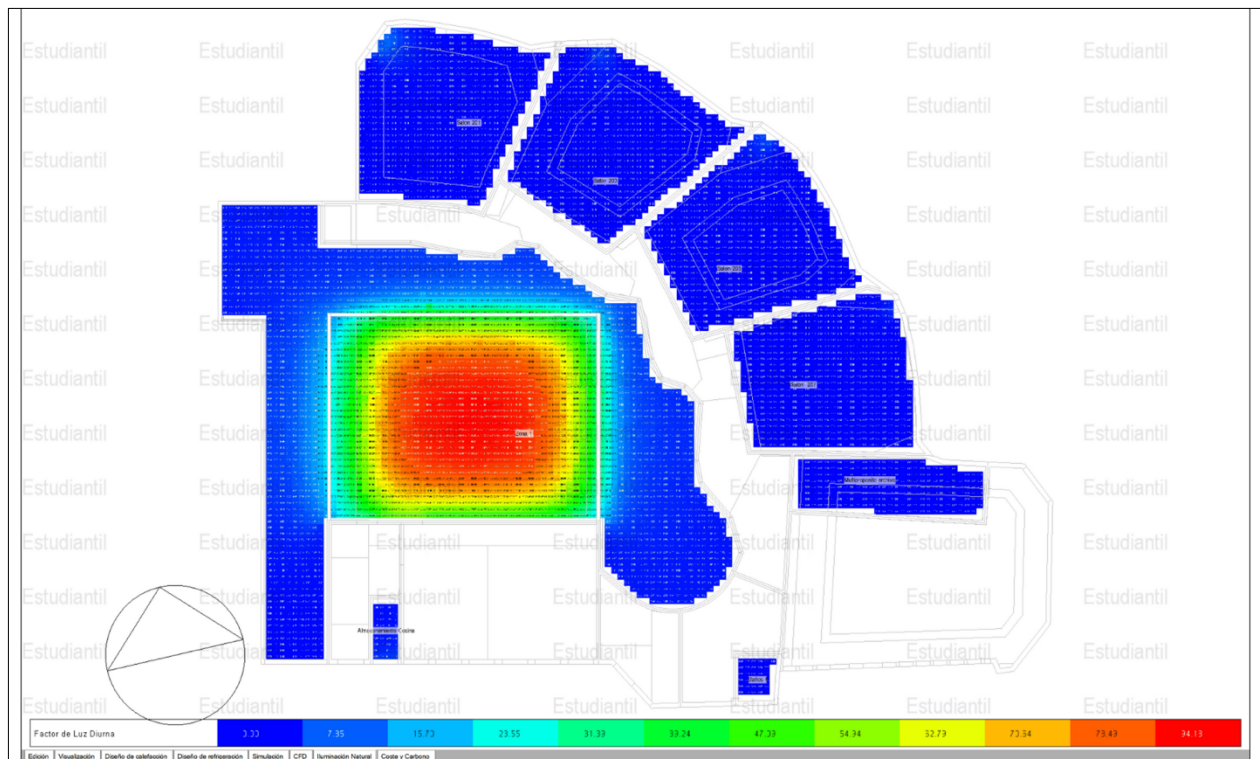


Fig. 33 Simulación de iluminación natural Aulas Piso 2 Escuela de Enfermería de Univalle (DF 0 - 94)

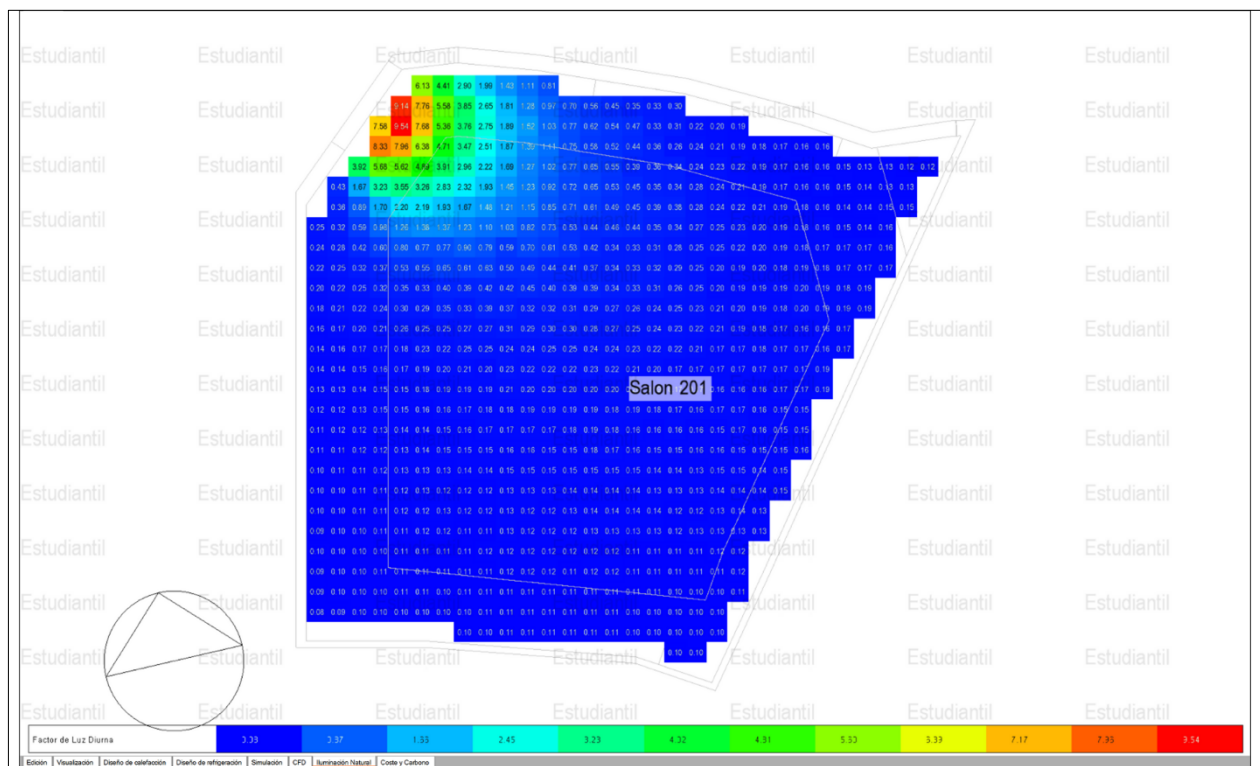


Fig. 34 Área representativa para mostrar evolución en iluminación natural en zona Aulas Piso 2 (DF 0 - 9.5)

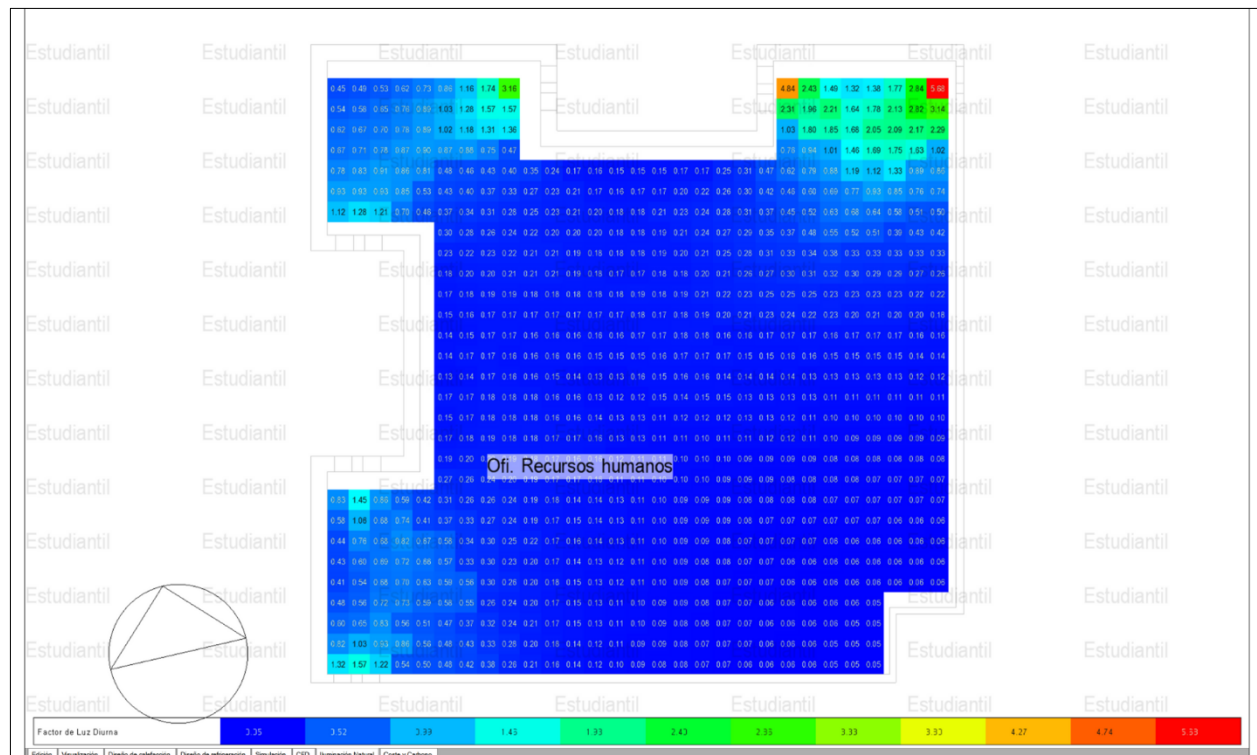


Fig. 35 Área representativa para mostrar evolución en iluminación natural en zona Oficinas Piso 1 (DF 0 - 5.7)

b) Escenario mejorado con estrategias de diseño pasivo.

En este escenario se proponen modificaciones arquitectónicas como las mostradas en las franjas sombreadas de las Fig. 36, Fig. 37 y Fig. 38 las cuales incluyen la apertura de ventanas con una relación ventana-pared no mayor al 30% que incluyen aleros y cortasoles en las zonas “Oficinas Piso 1” y “Aulas Piso 2”, y la apertura de tragaluces en la zona “Aulas Piso 2” orientados principalmente sobre el eje norte-sur. El objetivo principal con esta propuesta es mejorar la iluminación natural, es decir tener un DF mayor al actual, sin producir deslumbramiento ni incrementar la carga térmica de los espacios. Bajo este escenario, la carga térmica simulada es de **28.6 TR (100.6 kW)** tan solo un 2.1% mayor al caso base o actual (véase resultados en apéndice VI).

En cuanto a la iluminación natural todas las áreas de las zonas “Oficinas Piso 1” y “Aulas Piso 2” mostraron mejoras significativas pero no suficientes para alcanzar valores de $DF > 3$ en la mayoría del área, sin embargo, ya no se tienen zonas con valores de cero como se muestra en las Fig. 39 y Fig. 40. En el caso particular del Salón 201 y la Oficina de Recursos Humanos muestran que las estrategias propuestas funcionan pero siguen sin alcanzar los valores mínimos

recomendados para el uso actual. Por lo anterior, se evidencia que las características constructivas de la edificación no permiten obtener mejores valores de iluminación natural sin recurrir a una mayor área de ventanas y tragaluces lo que incrementaría drásticamente la carga térmica del espacio llegando a generar incluso deslumbramiento. Sin embargo, tener una mejor iluminación natural que el caso base permitirá que la potencia usada para la iluminación artificial sea menor e incluso que sea regulable lo que trae ahorros en consumo de energía.



Fig. 36 Fachada Zona Aulas Piso 2 con ventanas, aleros y cortasoles propuestos en EEU

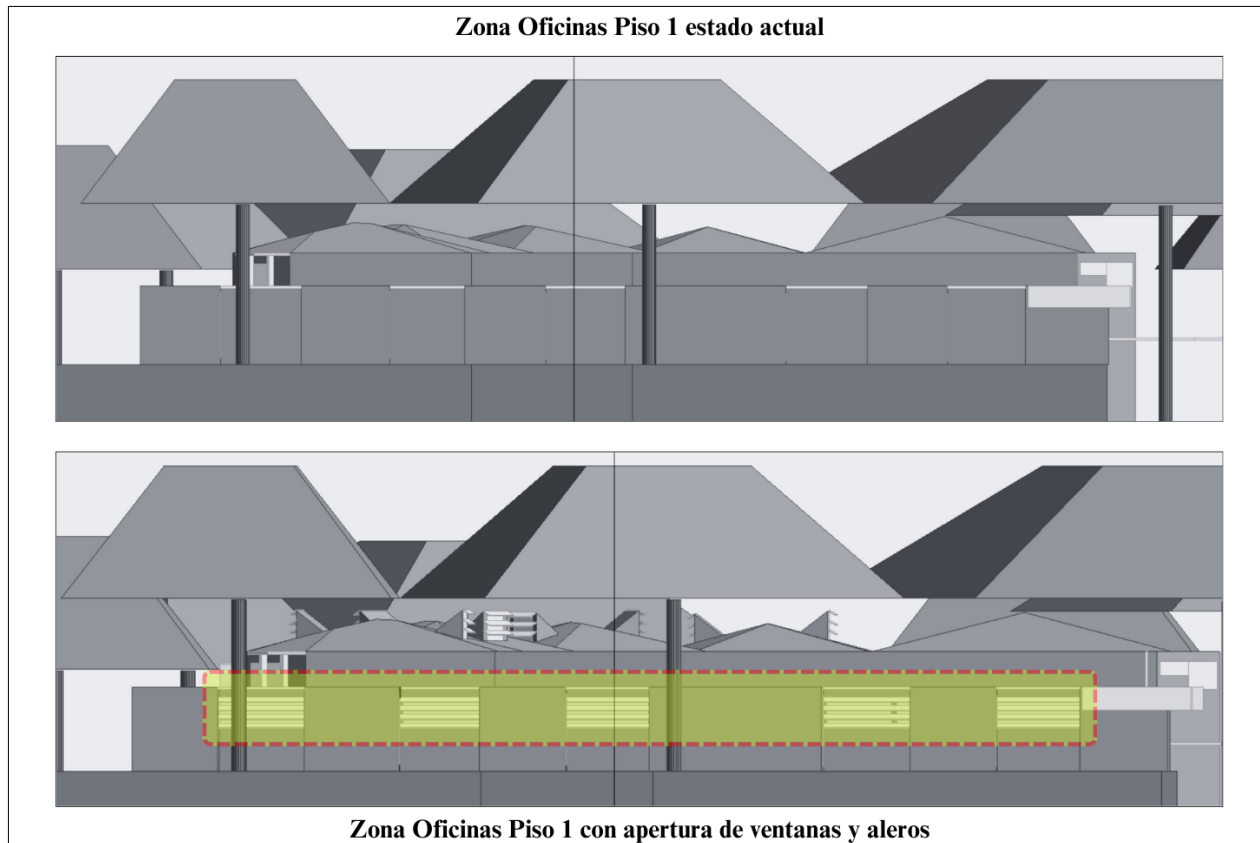


Fig. 37 Fachada Zona Oficinas Piso 1 con ventanas y aleros propuestos en EEU

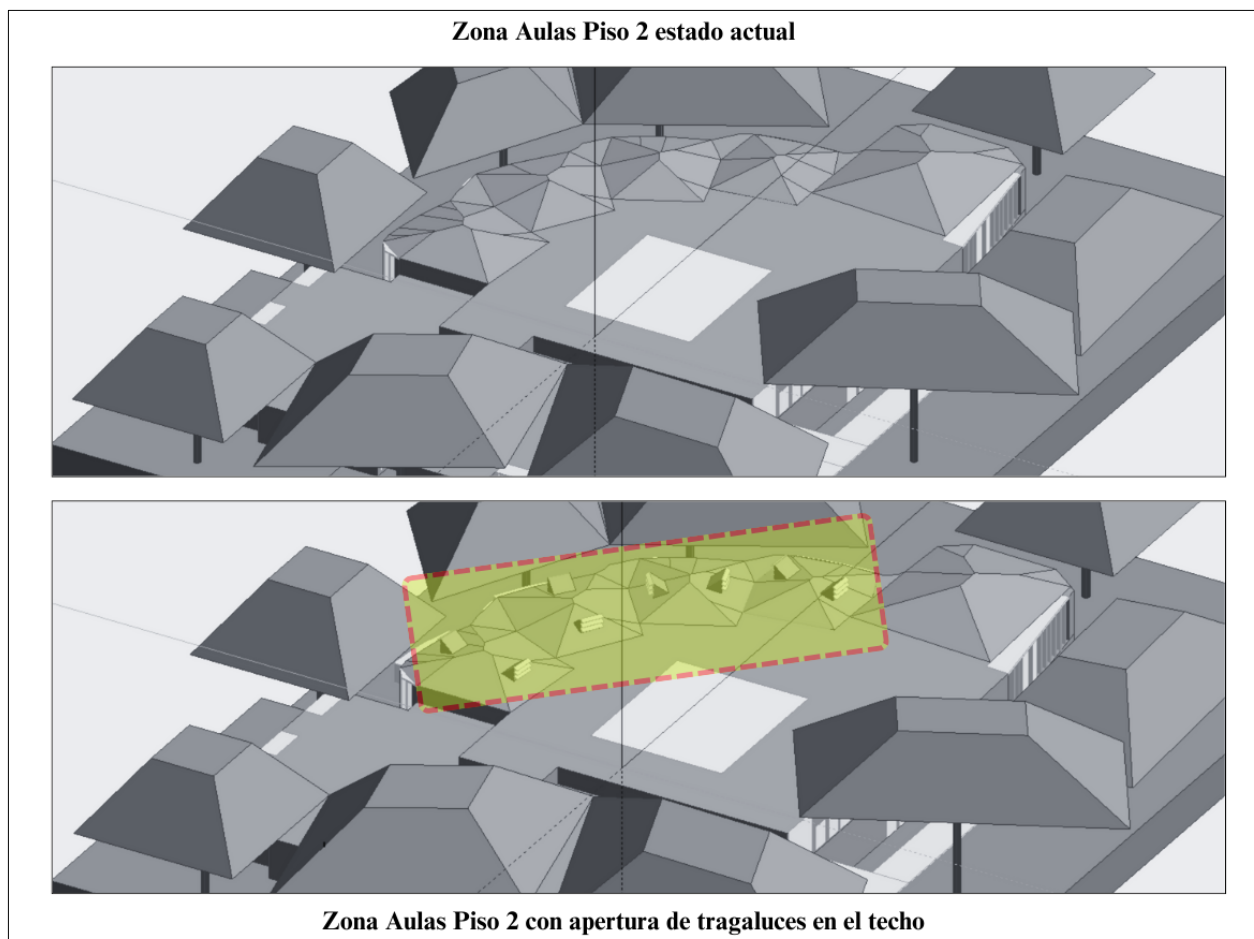


Fig. 38 Techo Zona Aulas Piso 2 con tragaluces propuestos en EEU

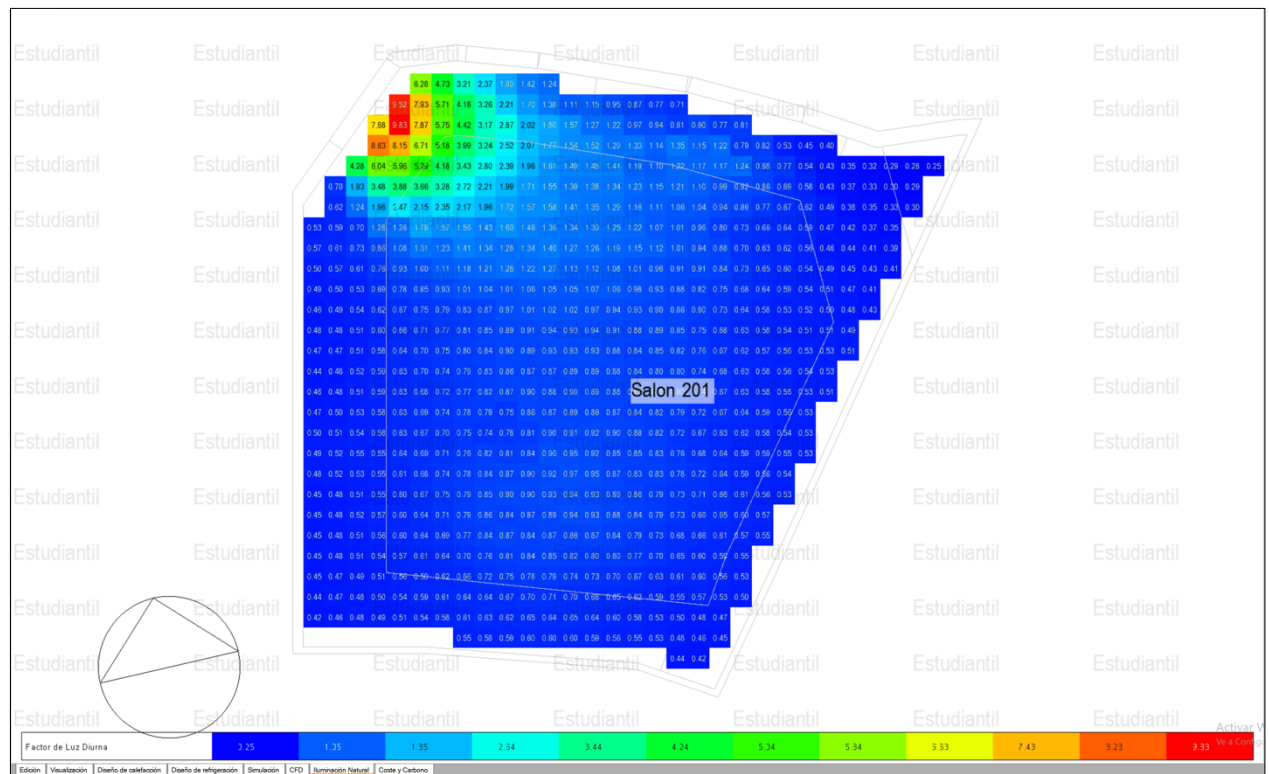


Fig. 39 Iluminación natural salón 201 Piso 2 con nuevas ventanas y tragaluces en techo (DF 0.25 – 9.33)

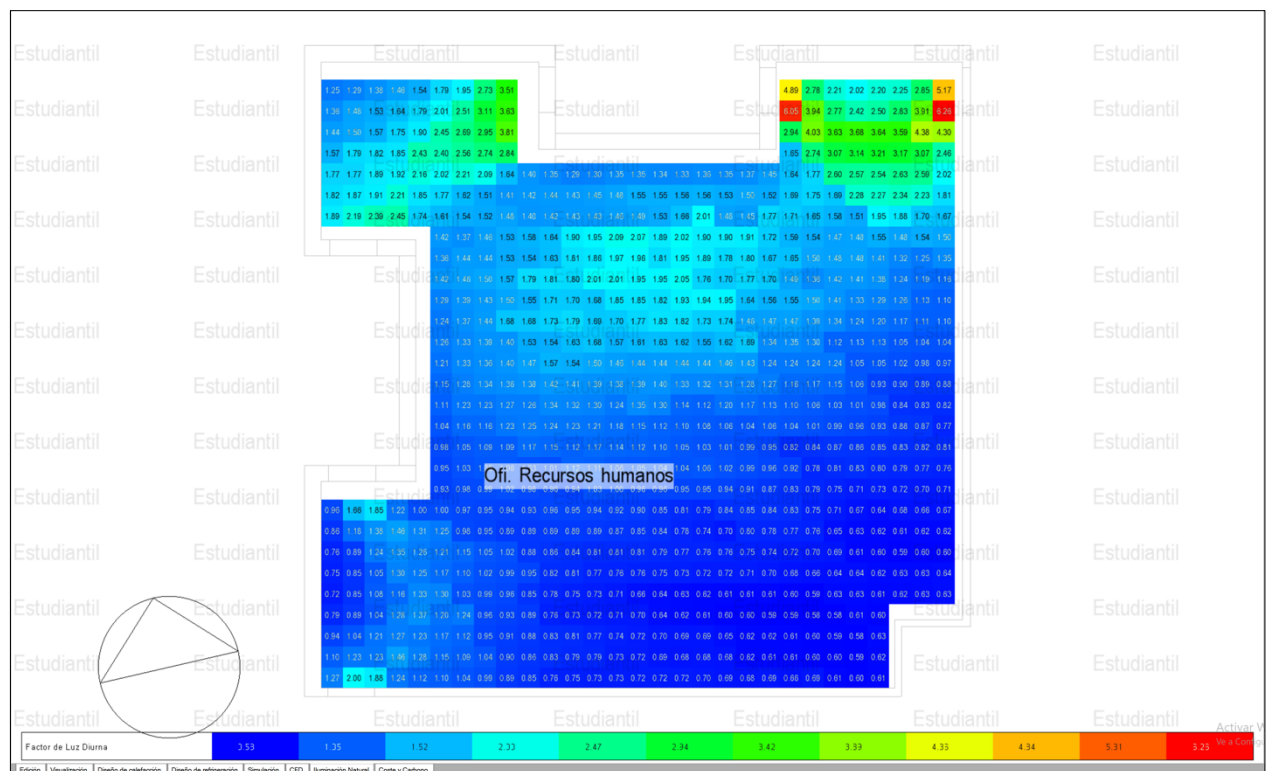


Fig. 40 Iluminación natural Oficinas Recursos Humanos Piso 1 con nuevas ventanas (DF 0.53 – 6.25)

c) Escenario mejorado con estrategias de diseño pasivo más Medidas de Eficiencia Energética (MEE).

Este escenario incorpora la sustitución de la iluminación fluorescente actual por sistemas LED, aislamiento térmico en el techo de las zonas de “Oficinas Piso 1” y “Aulas Piso 2”, uso de vidrios de alto rendimiento para minimizar la carga térmica y la sustitución de equipos de climatización por modelos de mayor eficiencia y refrigerantes ecológicos.

Para el caso de la iluminación se estima según la práctica comercial que los ahorros de energía por usar luminarias tipo LED están entre el 50% y 85% dependiendo si se compara con luminarias de bajo consumo o las tradicionales fluorescentes. Para este caso tomaremos un valor conservativo promedio del 70% de ahorro de energía por lo que nuestra línea base de consumo actual calculada con la PEA (véase apéndice II) de **7,766 kWh-año** pasaría a **2,330 kWh-año** como se puede observar en el apéndice VII.

En el caso del uso de un vidrio de alto desempeño se tiene que mencionar que las características del vidrio usado para simular el caso base son: $U=5.78 \text{ W/m}^2\text{K}$, $SHGC=0.81$ y $T_v=0.88$, mientras que para este escenario aplicando MEE tenemos un vidrio con las siguientes especificaciones: $U=5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $SHGC=0.39$ y $T_v=0.69$, el cual mantiene un valor U casi igual al del caso base pero el coeficiente de ganancia solar se reduce prácticamente a la mitad lo que es beneficioso para reducir la ganancia solar a través de ventanas nuevas y existentes incluyendo los tragaluces propuestos. Adicionalmente se contempló la implementación de aislamiento térmico en las cubiertas que contempla una capa de protección externa de aislante a base de espuma rígida de poliestireno de 2” de espesor más una capa de protección externa en acrílico elastomérico de 3 mm de espesor. Esta configuración permitió tener un valor $U=0.46 \text{ W/m}^2\text{K}$ que comparado con el del caso base, $U=2.44 \text{ W/m}^2\text{K}$, es considerablemente mucho menor. Con base en las MEE propuestas se calculó nuevamente la carga térmica obteniendo un valor de **21.4 TR (75.2 kW)** que equivale a una reducción del 25% con respecto al escenario donde se incluyeron solo las medidas pasivas (véase apéndice VIII).

También se propone que los sistemas de climatización actuales sean reemplazados por unos de mayor eficiencia y que trabajen con refrigerante de bajo GWP. Los sistemas actuales se estima que operan con un valor estimado de eficiencia de 1.3 kW/TR lo cual hace que el consumo energético anual según la PEA realizada sea aproximadamente de **36,776 kWh-año** (véase apéndice II). La propuesta es que los nuevos sistemas tengan al menos una eficiencia menor a 0.67

kW/TR lo cual permitiría tener valores de consumo anual cercanos a los **14,519 kWh-año** que equivale a una reducción del 60.5%, aproximadamente (véase apéndice VII).

Lo anterior sumado a las MEE propuestas y simuladas permiten tener un consumo energético de **33,736 kWh-año** el cual es menor a los **61,425 kWh-año** que arrojó la PEA. Además se tendría un nuevo EUI proyectado para la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) de **22.8 kWh/m²-año** que representa una disminución del 42.1% con respecto a la línea base. También la desagregación del uso de la energía tendría una distribución diferente como se observa en la Fig. 41 lo que evidencia que existen aún oportunidades de mejorar la eficiencia energética y disminuir el consumo de energía si se tienen en cuenta equipos de cómputo también más eficientes.

En este escenario las emisiones de CO_{2e} fueron calculadas utilizando el EUI y aplicando factores de conversión específicos que consideran la fuente de energía y la eficiencia de la red eléctrica nacional. Los resultados mostrados en la Fig. 42, de **4.3 tCO_{2e}-año (en sitio)** y **13.7 tCO_{2e}-año (en la fuente)**, representan el impacto ambiental directo del consumo de energía proyectado de la EEU y muestran una reducción del 44.1% con respecto a la línea base actual.

Por otra parte, para estimar las emisiones de CO_{2e} derivadas del uso de refrigerantes en los sistemas de climatización de la EEU se tuvo en cuenta que, para el reemplazo de los sistemas de climatización, actualmente existen en el mercado sistemas de climatización tipo “*Split*” que usan refrigerante R-32 y que puede llegar a usar hasta un 30% menos de refrigerante que un sistema con R-410A. Este refrigerante tiene un Potencial de Calentamiento Global (GWP) de 675 kg de CO_{2e} por kg de refrigerante liberado a la atmósfera. Con base en la capacidad total que tendrían los sistemas de climatización según la carga térmica calculada de 21.4 TR (75.2 kW) y estimando que el contenido promedio de refrigerante por tonelada es de aproximadamente 0.7 kg/TR (incluyendo equipo y tuberías), se tendrían aproximadamente un total de 15 kg de refrigerante en los sistemas de climatización. Ahora, considerando una tasa de fuga anual del 5%, típica en sistemas bien mantenidos, se estima una liberación anual de aproximadamente 0.75 kg de R-32. Esto resulta en emisiones anuales de **0.5 tCO_{2e}** lo que resultaría en una reducción de más de 10 veces el valor actual para equipos que trabajan con R-410A.

Es importante resaltar que esta comparación se hace para poder tener una referencia práctica uno a uno con el mismo tipo de sistema, sin embargo, no es un secreto que en términos de Calidad del Aire Interior (IAQ), distribución de aire en zona y confort térmico, los sistemas tipo “*Split*” de

pared o techo no son una buena alternativa y es preferible realizar un análisis y diseño detallado de un sistema de climatización que pueda brindar unas mejores condiciones globales de IEQ.

Finalmente, las emisiones totales de CO_{2e} en sitio equivalen a **4.8 tCO_{2e}** lo cual representa una reducción del 63.3% de las emisiones con respecto al estado actual de la EEU.

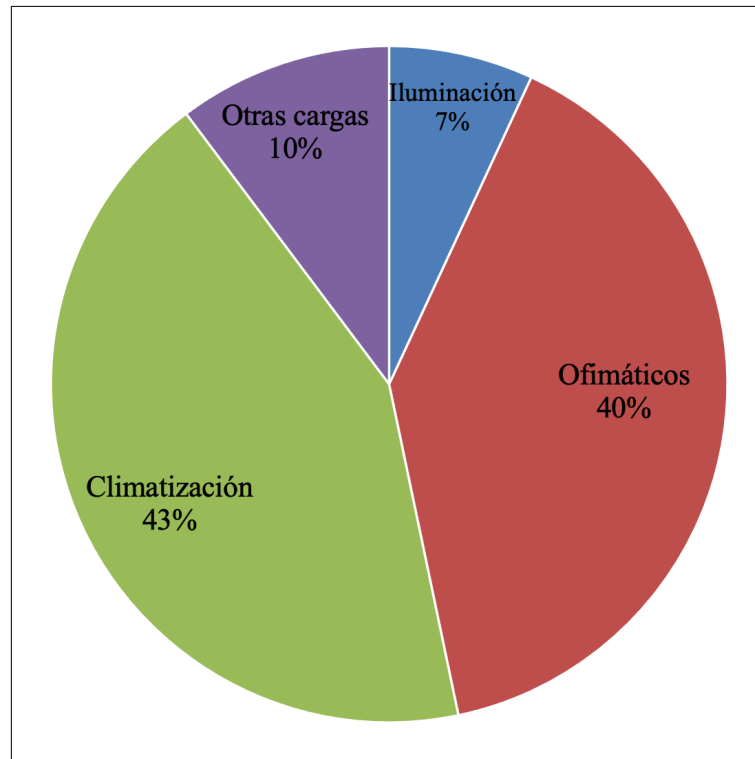


Fig. 41 Desagregación del uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) con diseño pasivo y MEE

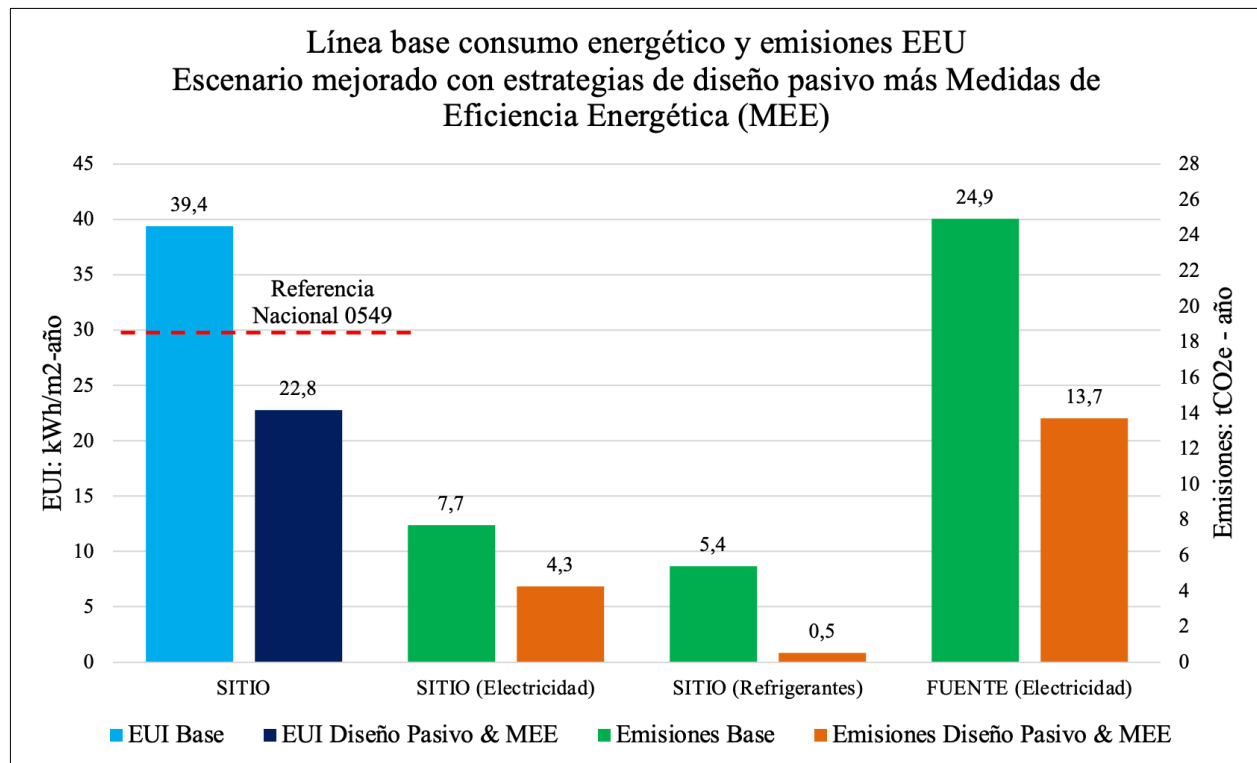


Fig. 42 Líneas base de consumo energético (kWh/m²-año) y emisiones (tCO₂e-año) para Escuela de Enfermería Univalle (EEU) proyectadas con diseño pasivo y Medidas de Eficiencia Energética (MEE)

d) Integración total de estrategias de diseño pasivo, MEE y Energías Renovables.

Este escenario suma a las mejoras anteriores, la instalación de paneles fotovoltaicos para cubrir las necesidades residuales de iluminación artificial maximizando la sostenibilidad de la edificación y acercándose a los estándares de una Edificación Neto Cero (ENC). Este escenario no pretende presentar un diseño detallado de un sistema de generación eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos, simplemente mostrará que la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) tiene la disponibilidad de área en techo para implementar un sistema como estos partiendo de la premisa que la necesidad de iluminación artificial ya ha sido disminuida a través de las estrategias pasivas y las Medidas de Eficiencia Energética (MEE).

Por lo anterior, la necesidad de iluminación artificial luego de estas mejoras es de **2,330 kWh-año** (véase apéndice VII) o 1,079 Wh día según las horas de operación semanal y mensual estimadas y para establecer la cantidad de paneles solares y el área que estos ocuparían en cubierta se tendrá en cuenta que un panel comercial de 2.6 m² de área puede ofrecer hasta 530 Wh siempre y cuando se tenga una radiación solar disponible de 1,000 W/m², sin embargo, como ya hemos

explicado anteriormente, disponer de una radiación solar constante de 1,000 W/m² es imposible debido principalmente a la nubosidad y a que la insolación baja con el pasar de las horas por lo que se hace necesario realizar un análisis más realista de la cantidad real de energía producida por los paneles teniendo en cuenta también su degradación con el tiempo y con base en esto establecer la cantidad necesaria. Es por esto que tomando los datos climáticos comprendidos entre el 2013 y 2023 (10 años) de la estación meteorológica de la Universidad del Valle, la Fig. 11 y la TABLA IV podemos ver que la radiación solar disponible a las 6 AM prácticamente es nula, a las 9 AM escasamente es de 466 W/m², sobre las 11 AM alcanza su valor máximo de 857 W/m² que equivale tan solo al 86% de la radiación requerida por el panel para ofrecer su máxima capacidad, y ya sobre las 2 PM la radiación vuelve y cae a 381 W/m² y sigue disminuyendo hasta valores muy lejanos al ideal de 1,000 W/m² requerido por el panel fotovoltaico. A lo anterior hay que sumarle que no se está considerando las ineficiencias ocasionadas por sistemas de conversión o almacenamiento de la energía generada por el panel fotovoltaico.

Entonces en la TABLA IV se muestran la necesidad de la EEU, la radiación solar promedio disponible durante un día y las eficiencias de conversión de energía de los paneles fotovoltaicos tanto nuevos como usados hasta los 25 años y con base en esto se calcula la potencia real entregada por cada panel nuevo que en el mejor de los casos sobre las 11 AM puede entregar 454 Wh pero sobre el final de su vida útil tan solo estará en la capacidad de entregar 122 Wh lo que equivale a un 272% menos que cuando se instaló. También se puede observar que bajo estas premisas la cantidad de paneles requeridos nuevos sería de 3 si solo contemplamos la franja horaria entre las 10 AM y la 1 PM donde la radiación solar disponible permitiría al panel fotovoltaico entregar más del 75% de su capacidad máxima. Sin embargo, si tenemos en cuenta los 25 años del ciclo de vida del panel con su respectiva degradación anual del 0.6% y contemplando que su eficiencia máxima de conversión de energía es del 20.5% cuando está nuevo podemos observar que en el año 5 a las 11 AM solo puede entregar 388 Wh un 14.6% menos que cuando estaba nuevo, en el año 10 entregaría 321 Wh un 29.3% menos que cuando se instaló, en el año 15 solo produciría 255 Wh un 43.8% menos que cuando inició su funcionamiento, en el año 20 generaría solo 188 Wh un 58.6% menos que cuando estaba nuevo y ya sobre el final del ciclo de vida en el año 25 el panel solo podría entregar unos 122 Wh que equivale a un 73.1% menos de capacidad que cuando se instaló.

Aunque el anterior análisis es simplemente analítico, ya que tan solo contamos con datos del clima y teóricos de fichas técnicas de fabricantes de paneles fotovoltaicos, se considera que las

hipótesis planteadas no están descabelladas y los resultados obtenidos pueden tenerse en cuenta para definir la cantidad de paneles requeridos. Por lo tanto, si se realiza la instalación de solo 3 paneles teniendo en cuenta la eficiencia cuando están nuevos y como ya se observó su degradación con el tiempo afecta considerablemente la potencia real entregada y si se tiene en cuenta este factor más el ciclo de vida de los paneles pues se deberían contemplar al menos la instalación de 10 paneles o proyectar irlos instalando progresivamente. El área requerida para estos paneles sería mínimo de 30 m² y su ubicación en la EEU sería como se muestra en la zona punteada de la Fig. 43 donde se aprecia que en la franja horaria entre las 10 AM y 1 PM donde se tienen los máximos valores de radiación solar no se tendría sombra alguna de los árboles del entorno y permitiría orientarlos hacia el sur.

Ahora bajo las hipótesis planteadas las horas de iluminación artificial que estén por fuera de este horario (10 AM – 1 PM) no podrán ser cubiertas directamente por energía renovable a no ser que se incluya un sistema de almacenamiento de energía con baterías, lo que hace más costoso la implementación y menos sostenible por el uso de baterías. Entonces se estima que el resto de las horas pueda seguir siendo alimentado desde la red eléctrica por lo cual tendríamos un EUI proyectado para la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) de **21.9 kWh/m²-año** que representa un 44.4% con respecto a la línea base. Sin embargo, su disminución con relación al anterior escenario que ya incluye estrategias pasivas y Medidas de Eficiencia Energética (MEE) es tan solo del 3.9% lo que nos invita a reflexionar sobre si realizar esta inversión vale la pena o quizás sea más rentable invertir en el cambio de los equipos ofimáticos que aún siguen contribuyendo de manera importante en el consumo energético de la edificación. En cuanto a la desagregación del uso de la energía, la Fig. 44 muestra la nueva distribución donde la iluminación artificial pesa solo el 3% y equivaldría a **899 kWh-año** (véase apéndice IX).

Las emisiones de CO_{2e} relacionadas con el consumo energético de la EEU en este caso quedarían ajustadas como se muestra en la Fig. 45 a **4.1 tCO_{2e}-año (en sitio)** y **13.1 tCO_{2e}-año (en la fuente)** lo cual representa una reducción del 4.7% con relación al escenario anterior sin energías renovables y un 46.8% con relación a la línea base actual. Finalmente, las emisiones totales de CO_{2e} en sitio equivalen a **4.6 tCO_{2e}** lo cual representa una reducción del 64.9% de las emisiones con respecto al estado actual de la EEU.

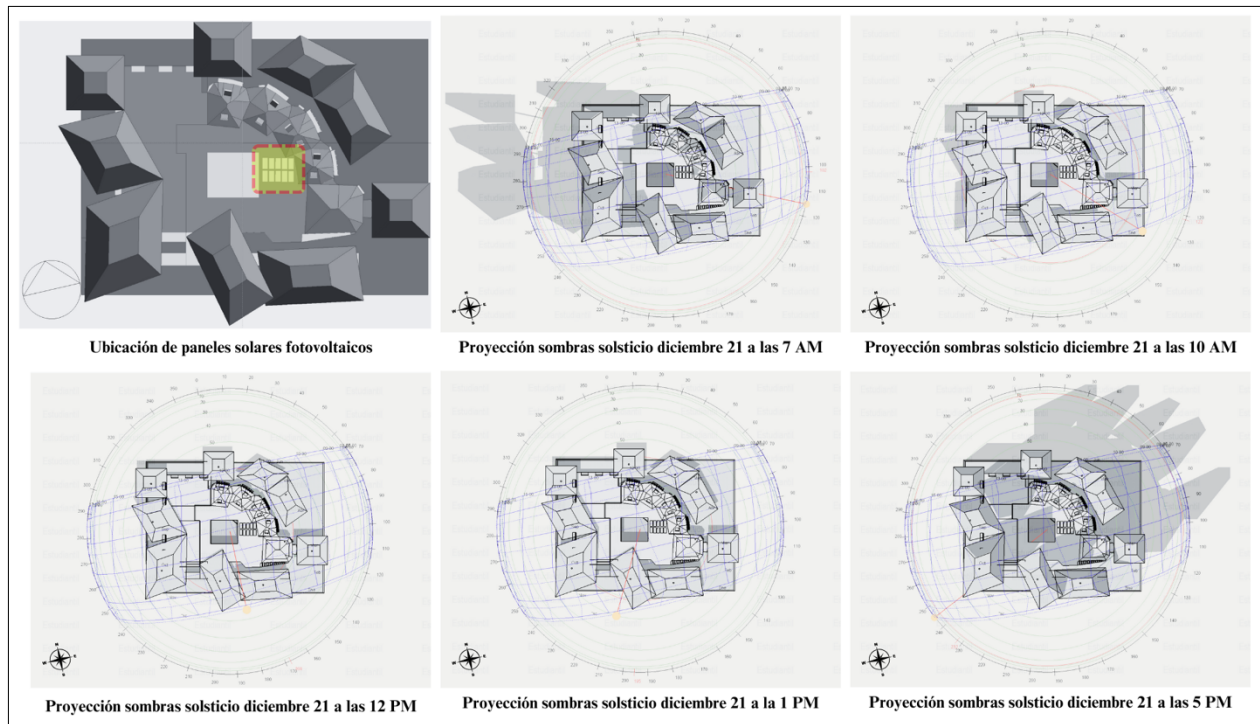


Fig. 43 Ubicación de paneles solares fotovoltaicos en cubierta Escuela Enfermería de Univalle (EEU)

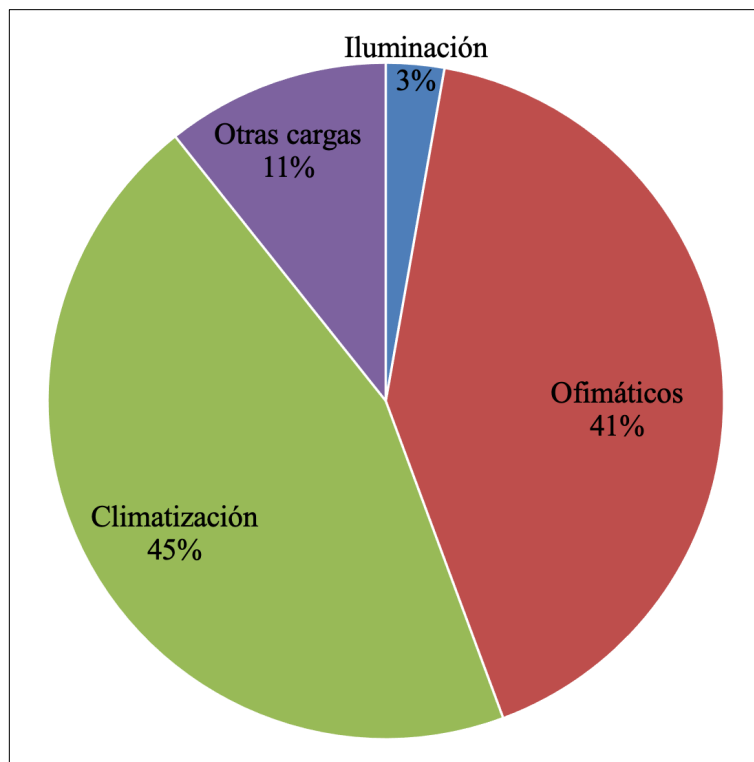


Fig. 44 Desagregación del uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) con diseño pasivo, MEE y Energías Renovables (ER)

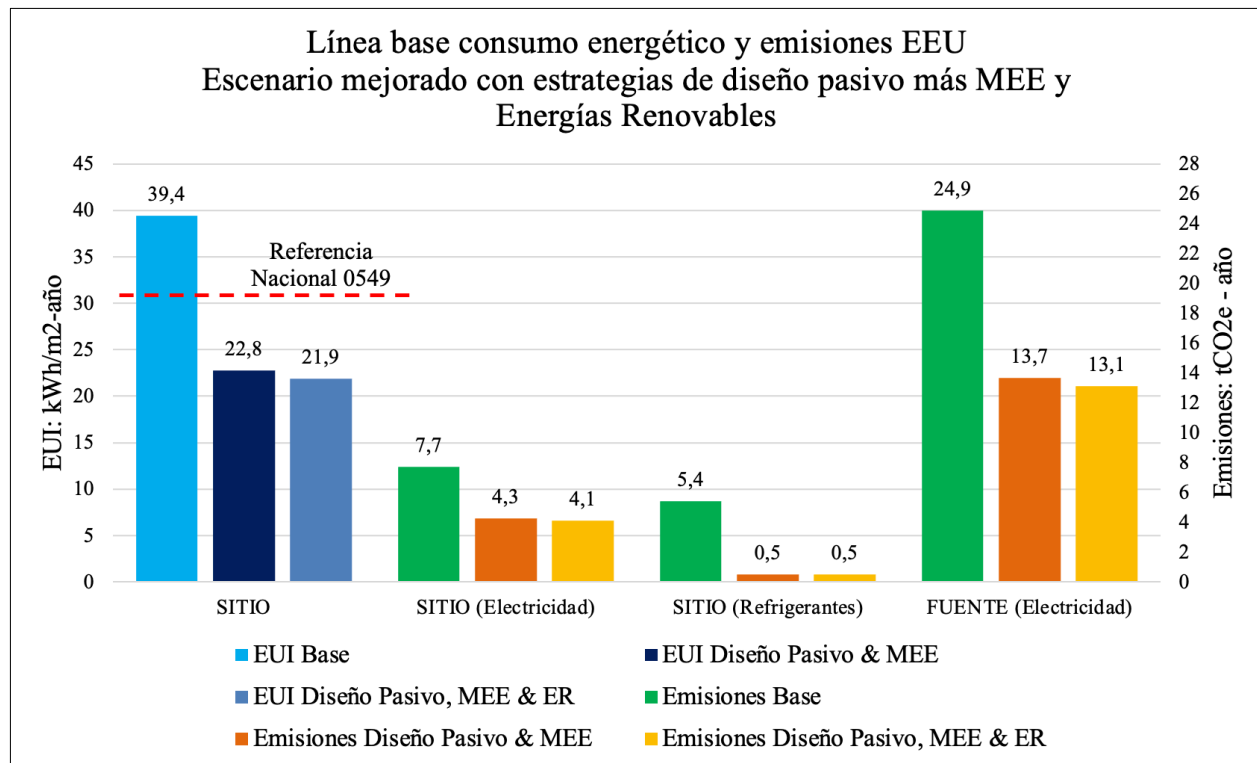


Fig. 45 Líneas base de consumo energético (kWh/m²-año) y emisiones (tCO₂e-año) para Escuela de Enfermería Univalle (EEU) proyectadas con diseño pasivo más MEE y Energías Renovables (ER)

TABLA IV ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA INSTALACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Hora del día	6 a.m.	7 a.m.	8 a.m.	9 a.m.	10 a.m.	11 a.m.	12 p.m.	1 p.m.	2 p.m.	3 p.m.	4 p.m.	5 p.m.	6 p.m.
Necesidad diaria de la EEU (Wh)	1.079												
Radiación promedio diaria 2013-2023 (W/m ²)	2	95	245	466	855	857	753	776	381	360	310	43	12
Potencia nominal de un panel fotovoltaico (Wh)	530												
Porcentaje de eficiencia panel nuevo (%)	20,5												
Radiación requerida para potencia pico de panel (W/m ²)	1.000												
Área de panel (m ²)	2,6												
Porcentaje de potencia real entregada según radiación solar disponible (%)	0,2%	10%	25%	47%	86%	86%	75%	78%	38%	36%	31%	4%	1,2%
Potencia real entregada por panel (Wh)	1,1	50	130	247	453	454	399	411	202	191	164	23	6

Cantidad de paneles nuevos requeridos	1018	21	8	4	2	2	3	3	5	6	7	47	170
Viabilidad técnica para instalar paneles nuevos	no	no	no	si	si	si	si	si	si	no	no	no	no
Ajuste según pérdidas de eficiencia acumulada (-3%) en año 5	0,9	43	111	211	387	388	341	351	172	163	140	19	5
Ajuste según pérdidas de eficiencia acumulada (-6%) en año 10	0,7	36	92	175	320	321	282	291	143	135	116	16	4
Ajuste según pérdidas de eficiencia acumulada (-9%) en año 15	0,6	28	73	139	254	255	224	231	113	107	92	13	4
Ajuste según pérdidas de eficiencia acumulada (-12%) en año 20	0,4	21	54	102	188	188	166	171	84	79	68	9	3
Ajuste según pérdidas de eficiencia acumulada (-15%) en año 25	0,3	13	35	66	121	122	107	110	54	51	44	6	2
Cantidad de paneles requeridos en el año 25	3.797	80	31	16	9	9	10	10	20	21	24	177	633
Área requerida para instalación de paneles fotovoltaicos (m2)	10.859	229	89	47	25	25	29	28	57	60	70	505	1.810
Viabilidad técnica implementación contemplando 25 años	no	no	no	no	si	si	si	si	no	no	no	no	no

e) Porcentaje de cumplimiento de metas de reducción de líneas base

Con base a los cuatro escenarios propuestos para simular y proyectar las estrategias pasivas, la implementación de las Medidas de Eficiencia Energética (MEE) y la inclusión de energías renovables se puede afirmar que la meta de reducción del 30% del consumo energético con respecto a la línea base para el 2030 se estarían cumpliendo ya que se ha demostrado que el EUI de Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) pasaría de **39.4 kWh/m²-año** a **21.9 kWh/m²-año (si se incluyen los paneles solares)**, que equivale a un **44.4%** de reducción y estaría en un buen punto de partida para lograr el exigente 70% de reducción en 2040.

En lo que se refiere a las emisiones de CO_{2e} en sitio relacionadas con el carbono operativo tendríamos una situación similar ya que la EEU pasaría de **13.1 tCO_{2e}** a **4.6 tCO_{2e}**, que equivale a un **64.9%** de reducción superando ampliamente la meta de reducción para el 2030 del 30% de las emisiones y quedando muy cerca a la meta del 70% para el 2040.

VII. PROPUESTA TÉCNICA

Esta propuesta se fundamenta en el caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería Univalle (EEU), que servirá como base para desarrollar una Hoja de Ruta escalable a otras edificaciones del campus. Considerando el contexto climático de Cali, este capítulo integra estrategias y técnicas de diseño pasivo, construcción sostenible y operación eficiente de edificaciones, con el concepto de Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning como elemento transversal. La VTE, aplicada en todas las fases del ciclo de vida de una edificación garantiza que las estrategias propuestas se validen y optimicen desde el diseño hasta la operación, alineándose con objetivos de sostenibilidad, eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ).

Esta propuesta está fundamentada ampliamente los conocimientos adquiridos en la Maestría de Arquitectura y Urbanismo de Univalle y en los lineamientos, herramientas y estándares desarrollados por ASHRAE que aseguran un enfoque técnico y probado que responde a las necesidades específicas del contexto climático de Cali y los objetivos de descarbonización propuestos para el campus universitario.

Este capítulo se organiza en cuatro secciones, cada una diseñada para cumplir con los objetivos específicos de esta tesis y abordar de manera general las estrategias necesarias para alcanzar edificaciones sostenibles y energéticamente eficientes en Univalle.

- 1. Sección A (requerimientos mínimos de diseño sostenible):** Aquí se definen los requerimientos mínimos necesarios para incorporar estrategias de diseño pasivo en edificaciones institucionales complementadas por sistemas mecánicos o híbridos diseñados para mejorar la Calidad Ambiental Interior (IEQ). Además, se detalla cómo la VTE valida estas estrategias y sistemas en cada fase del diseño: prediseño, programa arquitectónico, diseño preliminar y detallado. Entre las estrategias presentadas se encuentran la optimización de la envolvente, el control solar, la iluminación natural y la ventilación natural que en conjunto con el uso de sistemas de climatización tradicionales garantizan un desempeño óptimo cuando las estrategias pasivas requieren un soporte adicional.
- 2. Sección B (parámetros de construcción hacia Neto Cero):** En esta sección se establecen los parámetros de construcción sostenible con base en los principios de Edificaciones Neto Cero

(ENC) y el proceso de VTE. Esta sección aborda la selección de materiales sostenibles, la gestión de recursos y la reducción del impacto ambiental durante la fase constructiva.

3. **Sección C (lineamientos de operación eficiente hacia Cero Energía):** Se presentan los lineamientos para la operación eficiente de edificaciones con base en los principios de Edificaciones Cero Energía (ECE). Aquí se toman como referencia los datos del trabajo de campo, simulaciones realizadas en DesignBuilder y los lineamientos del programa bEQ de ASHRAE, para establecer las líneas base de referencia sobre consumo energético y emisiones de CO_{2e}, al igual que las estrategias específicas para optimizar el funcionamiento de las edificaciones. La VTE acompaña, supervisa y establece un programa de operación y mantenimiento para ajustar tanto los sistemas pasivos como los activos con el objetivo de mantener el desempeño de las edificaciones con base en lo diseñado.
4. **Sección D (Hoja de Ruta):** Se propone una Hoja de Ruta para tener un método guía que consolide los resultados de las secciones anteriores, definiendo objetivos, roles, responsabilidades, hitos clave y un cronograma de implementación. Este plan estratégico se soporta con la experiencia adquirida en el programa de CEELA: Universidades Cero Emisiones, la cual permitió tener una guía práctica de como elaborar hojas de ruta para edificaciones institucionales de uso académico. Con este documento, Univalle estará en capacidad de implementar acciones efectivas que no solo mejoren la eficiencia energética y la IEQ, sino que también impulsen la sostenibilidad en sus instalaciones y programas académicos.

Finalmente, nuestra propuesta de incluir la VTE como un elemento fundamental para alcanzar el objetivo de edificaciones Neto Cero se sustenta en la experiencia profesional adquirida en Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S. (CDC S.A.S.), donde la implementación de la VTE ha demostrado ser una buena práctica de ingeniería para optimizar el rendimiento energético y garantizar la Calidad Ambiental Interior (IEQ) en edificaciones tanto nuevas como existentes. Esta experiencia real enriquece esta propuesta técnica la cual está orientada a convertir las edificaciones de Univalle en espacios resilientes, sostenibles y eficientes.

A. Requerimientos mínimos de diseño pasivo y el proceso de Commissioning en el diseño de edificaciones

En la fase de diseño de una edificación es importante definir los principios técnicos que regirán para cumplir con los objetivos de eficiencia energética, Calidad Ambiental Interior (IEQ) y sostenibilidad. Sin embargo, las prácticas tradicionales de diseño suelen carecer de un marco metodológico que asegure la integración temprana y la validación técnica apropiada de estrategias y técnicas de diseño pasivo. En este contexto, la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning surge como una valiosa herramienta para estructurar, verificar y optimizar dichas estrategias y técnicas desde las fases iniciales del proyecto.

Durante esta etapa, la VTE proporciona un proceso centrado en la calidad que refleja los objetivos del propietario en soluciones técnicas viables y medibles a través de los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD). Estos documentos no solo guían el proceso de diseño, sino que también facilitan el trabajo colaborativo interdisciplinario y la validación continua de las decisiones que se tomen. En esta sección refleja cómo las estrategias y técnicas de diseño pasivo más relevantes para el clima de Cali se integran al proceso de la VTE considerando el uso institucional académico de las edificaciones. Sobre el final se presenta una tabla resumen con los principales aspectos a considerar en esta etapa de diseño.

1) Optimización de la envolvente y uso de recursos naturales

La envolvente de la edificación actúa como la primera barrera contra las ganancias de calor externas reduciendo las cargas térmicas de la edificación. Esto se traduce directamente en una mayor eficiencia energética ya que disminuye la dependencia de los sistemas de climatización tradicionales disminuyendo el consumo de energía asociado al enfriamiento. Además, al mantener más estable la temperatura interior, permite mejorar significativamente el confort térmico de los ocupantes optimizando así la Calidad Ambiental Interior (IEQ).

A continuación se detallan los requerimientos técnicos mínimos recomendados para la envolvente de la edificación que incluyen especificaciones de materiales y configuraciones constructivas destinadas a garantizar su eficiencia y sostenibilidad.

f) Muros

1. **Resistencia térmica (R):** Mínima $\geq 3.5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, basada en análisis realizados para el clima de Cali.
2. **Acabados reflectivos:** Pinturas con índice de reflectancia solar (SRI) ≥ 80 , que minimizan la absorción de calor en fachadas expuestas.
3. **Revestimientos exteriores:** Incorporación de recubrimientos cerámicos o metálicos con baja emisividad para fachadas orientadas al oeste donde las cargas térmicas son mayores.

g) Techos

1. **Resistencia térmica (R):** Mínima $\geq 5.0 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, garantizando aislamiento adecuado frente a la radiación solar directa.
2. **Barreras radiantes:** Reflectancia $\geq 97\%$, instaladas bajo la cubierta para bloquear la radiación solar y reducir la carga térmica interna. Uso de materiales como el aluminio multicapa con espesor mínimo de 10 micrómetros, instalado con una separación de aire de al menos 2 cm para maximizar su efectividad.
3. **Materiales aislantes:**
 - Poliuretano expandido con conductividad térmica $\leq 0.025 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, aplicado como espuma en techos para eliminar puentes térmicos.
 - Lana mineral con propiedades acústicas adicionales que sea adecuada para entornos académicos donde se requiere control de ruido.
4. **Cubiertas verdes:** En áreas específicas, el uso de techos verdes puede combinar beneficios térmicos y ecológicos, reduciendo las temperaturas superficiales en hasta 8°C y mejorando la IEQ al filtrar contaminantes del aire.

h) Vidrios

1. **Transmisión solar y conductividad:**
 - SHGC ≤ 0.30 para minimizar las ganancias térmicas por radiación solar.
 - Coeficiente U $\leq 1.6 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ para reducir las pérdidas y ganancias térmicas.
 - Vidrios con transmisión lumínica entre el 50% - 70% ajustados para maximizar la luz natural y minimizar el deslumbramiento.
2. **Configuración del acristalamiento:**

- Vidrios “Low-E” con doble acristalamiento y cámara de aire de 12 mm rellena con gas argón para mejorar el aislamiento térmico.
- En fachadas este y oeste incorporar láminas de control solar integradas al vidrio para reducir deslumbramiento y ganancias térmicas adicionales.

3. Diseño y orientación:

- Relación ventana-pared (WWR) de 30% - 40% para un equilibrio entre iluminación natural y confort térmico.
- Orientación prioritaria hacia el norte y sur para maximizar la luz difusa y reducir la radiación directa.

i) Impacto técnico esperado

1. Eficiencia energética:

- Reducción del 30% - 35% en cargas térmicas lo que puede disminuir el consumo energético en sistemas de climatización mecánica hasta en un 25%.
- Reducción de la capacidad necesaria de los sistemas de climatización disminuyendo costos iniciales y operativos.
- Ahorro energético anual estimado de 15 - 20 kWh/m², representando una mejora significativa en la sostenibilidad de la edificación.

2. Calidad Ambiental Interior (IEQ):

- Mejora en el confort térmico interior al mantener temperaturas estables durante el día y la noche.
- Eliminación de puntos de desconfort térmico y sensación de calor extremo. Que permiten alinearse con los parámetros de ASHRAE 55.
- Menor estrés térmico en los materiales de construcción lo que permite aumentar su durabilidad y reducir costos de mantenimiento.

2) Control solar

El control solar es una estrategia de diseño pasivo para mitigar las ganancias térmicas solares y optimizar el confort térmico y visual en el interior de las edificaciones. En un clima como el de Cali, donde la radiación solar es intensa y constante, los elementos arquitectónicos de sombreado combinados con el uso de vegetación permiten reducir significativamente las cargas

térmicas disminuyendo la dependencia de los sistemas de climatización tradicionales. Estas estrategias impactan directamente en la eficiencia energética de la edificación y mejoran su Calidad Ambiental Interior (IEQ).

A continuación, se detallan los requerimientos técnicos mínimos recomendados para los elementos de control solar junto con su impacto proyectado en la sostenibilidad y el desempeño energético de la edificación.

a) Elementos arquitectónicos para control solar

1. Brise-soleil:

- Diseñados para bloquear entre el 70% - 90% de la radiación solar directa en las fachadas este y oeste.
- Dimensiones y orientaciones ajustadas al ángulo solar promedio de Cali (aproximadamente 65° durante las horas críticas del día).
- Uso de materiales como el aluminio anodizado o madera tratada con recubrimientos reflectivos ($SRI \geq 75$).

2. Voladizos:

- Longitud calculada para proporcionar sombra completa en ventanas durante las horas pico (10:00 AM y 3:00 PM).
- Materiales con alta reflectancia térmica para evitar acumulación de calor.

b) Vegetación

- 1. Árboles de copa ancha:** Ubicados estratégicamente para sombrear fachadas y áreas exteriores cercanas reduciendo temperaturas en hasta 4°C.
- 2. Jardines verticales:** Instalados en fachadas críticas para actuar como barreras térmicas naturales y mejorar la calidad del aire exterior.

c) Impacto técnico esperado

1. Eficiencia energética:

- Reducción del 40% - 50% en ganancias térmicas solares disminuyendo la demanda de enfriamiento mecánico en hasta un 20% - 30%.

- Ahorro energético anual estimado de 12 - 18 kWh/m² gracias a la reducción en la carga de climatización.

2. Calidad Ambiental Interior (IEQ):

- Mejora del confort térmico en interiores al mantener temperaturas más estables y reducir el impacto de la radiación solar directa.
- Mejora del confort visual al reducir el deslumbramiento en aulas y oficinas.
- Beneficios psicológicos asociados a la presencia de vegetación en el entorno académico como reducción del estrés y aumento de la concentración.

3. Durabilidad y sostenibilidad:

- Prolongación de la vida útil de fachadas y elementos arquitectónicos al minimizar el impacto directo de la radiación solar.
- Reducción de costos de mantenimiento gracias al uso de materiales de alta durabilidad y vegetación de bajo requerimiento hídrico.

3) Iluminación natural

La iluminación natural es una de las estrategias más efectivas en el diseño pasivo para mejorar la eficiencia energética y la Calidad Ambiental Interior (IEQ). Permite reducir significativamente el consumo de energía asociado a la iluminación artificial, disminuyendo las emisiones CO_{2e} y los costos asociados a la operación de la edificación. Además, en entornos académicos la iluminación natural mejora el confort visual, ayuda a mejorar la productividad y genera espacios de aprendizaje saludables.

A continuación se detallan los requerimientos técnicos mínimos recomendados para la implementación de estrategias de iluminación natural junto con su impacto proyectado en el desempeño energético y ambiental de la edificación.

a) Relación ventana-pared (WWR):

1. **Proporción óptima:** Mantener una relación ventana-pared del 30% - 40% para equilibrar la entrada de luz natural y las ganancias térmicas ajustada según la orientación de las fachadas.
2. **Distribución por orientación:**
 - **Norte y sur:** Priorizadas por su luz difusa que reduce el deslumbramiento y las ganancias térmicas.

- **Este y oeste:** Limitadas en tamaño para minimizar las ganancias solares complementadas con dispositivos de sombreado externos.
3. **Materiales y sellos:** Vidrios con capas de baja emisividad “Low-E” y juntas herméticas para evitar infiltraciones y pérdidas.

b) Factor de luz día (DF):

1. **Rango objetivo:** Entre el 4% - 6% asegurando una iluminación uniforme y suficiente para actividades académicas sin necesidad de iluminación artificial durante las horas diurnas.
2. **Simulación:** Uso de herramientas como DesignBuilder para calcular y ajustar los niveles de iluminación según las características específicas del edificio.

c) Elementos auxiliares

1. **Reflectores:**

- **Materiales:** Reflectores internos de aluminio anodizado o pintura blanca con reflectancia $\geq 85\%$ para redirigir la luz hacia el interior de manera uniforme.
- **Diseño:** Colocados estratégicamente en alféizares y techos para maximizar la distribución lumínica.

2. **Tubos solares:**

- **Dimensiones y configuración:** Los diámetros son definidos según el diseño arquitectónico de la edificación y debe contar con acabados internos reflectantes y cúpulas de alta transparencia para capturar luz directa incluso en condiciones de nubosidad parcial.
- **Eficiencia lumínica:** Pérdidas $\leq 10\%$ en longitud máxima de 3 metros, adaptadas para aulas interiores sin acceso directo a ventanas.

3. **Tragaluces:**

- **Diseño:** Incorporación de difusores microestructurados para evitar deslumbramiento y mejorar la distribución de la luz.
- **Eficiencia:** Transmisión de luz $\geq 75\%$ asegurando una distribución homogénea en espacios grandes como auditorios o bibliotecas.
- Tragaluces periféricos que permiten gran iluminación, evitan insolación directa, y facilitan la ventilación natural.

d) Diseño y orientación de ventanas

1. **Altura y proporción:** Ventanas ubicadas a una altura mínima de 1.2 metros desde el suelo con un diseño elongado en la parte superior para captar más luz difusa.
2. **Inclinación de marcos:** Marcos inclinados hacia el interior (5° - 10°) para maximizar la entrada de luz natural y evitar sombras proyectadas.

e) Control de deslumbramiento

1. **Cortinas y persianas ajustables:** Sistemas operables diseñados para modular la intensidad lumínica según las necesidades de los usuarios.
2. **Superficies internas:** Acabados con reflectancia entre el 60% - 80% para maximizar la difusión de la luz y evitar puntos de alta intensidad.

f) Impacto técnico esperado

1. **Eficiencia Energética:**
 - Reducción del 25% - 30% en consumo energético asociado a iluminación artificial.
 - Ahorro anual estimado de 8 - 12 kWh/m² en edificaciones académicas gracias a la optimización de la iluminación natural.
2. **Calidad Ambiental Interior (IEQ):**
 - Mejora en el confort visual al garantizar niveles lumínicos uniformes y adecuados para actividades académicas.
 - Reducción del deslumbramiento y la fatiga ocular fomentando la productividad y el bienestar de los ocupantes.
 - Creación de espacios de aprendizaje más agradables y saludables.

4) Ventilación natural

La ventilación natural es una de las estrategias pasivas más importantes en el diseño bioclimático particularmente en climas como el de Cali. Se pueden aprovechar los principios de la flotabilidad térmica y la presión del viento para generar flujos de aire de manera natural mejorando la Calidad del Aire Interior (IAQ) y el confort térmico mientras se reduce la necesidad de usar sistemas climatización tradicionales. Esta estrategia es especialmente relevante en edificaciones académicas donde la alta densidad de ocupación requiere ambientes saludables y confortables.

A continuación se detallan los requerimientos técnicos mínimos recomendados para la implementación de estrategias de ventilación natural junto con su impacto proyectado en el desempeño ambiental y energético de la edificación.

a) Aberturas y configuración de ventanas

1. Dimensiones mínimas de aberturas:

- Las aberturas deben representar al menos el 10% - 12% del área del piso del espacio ventilado conforme a las recomendaciones de ASHRAE 62.1.
- En configuraciones de ventilación cruzada las aberturas deben ubicarse en fachadas opuestas para maximizar la presión diferencial y el flujo de aire.

2. Diseño y ubicación:

- Ventanas operables con control manual o automatizado asegurando acceso directo desde cualquier punto del espacio a 6 m de distancia.
- Integración de chimeneas solares en fachadas o cubiertas para incrementar el flujo de aire por flotabilidad térmica con áreas internas revestidas de materiales oscuros y de alta absorptividad ($\alpha \geq 0.90$).

3. Tipos de aberturas:

- Ventanas abatibles o proyectantes que optimicen la captura de viento.
- Láminas horizontales ajustables que regulen el flujo y protejan contra infiltraciones no deseadas durante lluvias torrenciales.

b) Estrategias complementarias

1. Control de infiltraciones (solo en casos de que sea necesario complementar con sistemas de climatización):

- Incorporación de sellos herméticos en marcos de ventanas y puertas utilizando siliconas de alta durabilidad con resistencia a temperaturas $\geq 200^{\circ}\text{C}$.
- Uso de espumas de poliuretano con baja conductividad térmica en juntas críticas.

2. Optimización del microclima externo: Integración de vegetación y árboles de copa ancha que permitan reducir la temperatura del aire circundante exterior.

3. Simulaciones CFD: Uso de herramientas avanzadas como DesignBuilder para modelar patrones de flujo de aire, identificar zonas de estancamiento y optimizar el diseño.

- 4. Extracción natural:** Aberturas en los techos o cielos falsos que pueden ser en tragaluces o en cumbreras para que salga el aire caliente por flotación o chimenea solar.

c) Monitoreo y control

1. Sensores activos:

- Sensores de CO₂, humedad relativa y temperatura para activar mecanismos automáticos de ventilación.
- Integración con sistemas BMS “*Building Management Systems*” que ajusten las aberturas y dispositivos en función de las condiciones internas y externas.

2. Criterios de diseño:

- Mantener temperaturas interiores objetivo alineadas con el método adaptativo de ASHRAE 55.
- Garantizar tasas de ventilación natural ≥ 5 ACH para aulas y auditorios asegurando una IAQ adecuada y confort.

d) Impacto técnico esperado

1. Eficiencia energética:

- Reducción del consumo energético asociado a sistemas de ventilación mecánica en un 20% - 30%.
- Ahorro anual estimado de 8 - 12 kWh/m² en edificaciones académicas.

2. Calidad Ambiental Interior (IEQ):

- Permite mantener niveles óptimos de CO₂ y PM2.5 promoviendo la salud y el bienestar de los ocupantes.
- Reducción de fluctuaciones de temperatura interior mejorando el confort percibido por los usuarios.
- Mayor dilución de contaminantes.

5) Sistemas mecánicos complementarios

En climas como el de Cali, los sistemas mecánicos complementarios son esenciales para garantizar niveles óptimos de Calidad Ambiental Interior (IEQ) y confort térmico cuando las estrategias pasivas no son suficientes para satisfacer las demandas de las edificaciones. Estas

tecnologías complementan y amplifican los beneficios de las estrategias de diseño pasivo, abordando aspectos relevantes como la deshumidificación, el control de contaminantes, la ventilación eficiente en espacios de alta densidad ocupacional y el uso de refrigerantes sostenibles en sistemas de climatización.

La integración de estos sistemas no solo optimiza el desempeño de la edificación sino que también reduce el consumo energético y las emisiones de CO_{2e}, contribuyendo de esta manera a la consecución de objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética. A continuación se detallan los requerimientos técnicos mínimos recomendados para los sistemas mecánicos complementarios y su impacto proyectado en el desempeño ambiental y energético de la edificación.

a) Tasas de renovación y ventilación mecánica:

1. Renovación de aire:

- **Aulas y auditorios:** ≥ 5 ACH conforme a ASHRAE 62.1.
- **Laboratorios y espacios críticos:** ≥ 10 ACH para garantizar un control riguroso de contaminantes.
- **Espacios de baja ocupación:** Mínimo 3 ACH para mantener niveles básicos de IAQ.

2. Distribución de aire:

- Conductos optimizados para minimizar pérdidas de presión y garantizar una distribución uniforme del aire.
- Incorporación de aberturas o de rejillas de retorno estratégicamente ubicadas para evitar zonas de estancamiento de aire.

3. Presurización y control de infiltraciones:

- Sistemas que mantengan una ligera sobrepresión en espacios críticos para evitar infiltraciones de aire contaminado desde zonas adyacentes.
- Uso de juntas herméticas y puertas con sellos para mejorar la estanqueidad de la edificación.

b) Filtración de aire

1. Filtros de alta eficiencia:

- Incorporación de filtros MERV 14, especialmente en espacios como laboratorios.
- Uso de filtros MERV 13 o superiores en sistemas generales capaces de capturar PM_{2.5} y contaminantes biológicos.

- 2. Monitoreo de filtros:** Uso de sensores integrados que detecten el nivel de saturación de los filtros permitiendo un mantenimiento predictivo y evitando caídas en el rendimiento.

c) Sistemas de recuperación de energía

1. Recuperación de calor sensible y latente:

- Recuperación mínima de $\geq 70\%$ de calor sensible y $\geq 50\%$ de calor latente del aire de extracción.
- Sistemas con intercambiadores rotativos o placas cruzadas para optimizar la transferencia de calor.

- 2. Diseño del sistema:** Integración de ERV/HRV²³ en zonas de alta ocupación para minimizar la carga térmica y reducir el consumo energético del sistema de climatización.

d) Serpientes de enfriamiento

1. Características generales:

- Serpientes de enfriamiento diseñados para mantener niveles de humedad relativa entre 50%-60%.
- Velocidad del paso del aire a través del serpentín de máximo 2.5 m/s (500 pies por minuto).
- Máximo número de aletas por pulgada de 12.

e) Refrigerantes para sistemas de climatización

1. Selección de refrigerantes:

- Priorizar el uso de refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP) y sin impacto en la capa de ozono (ODP).
- Opciones recomendadas:
 - R-32: Utilizado en sistemas de climatización por su bajo GWP y disponibilidad en el mercado colombiano.
 - R-1234yf y R-1234ze: Refrigerantes HFO²⁴ con bajo GWP, adecuados para sistemas avanzados de climatización.

²³ ERV: Energy Recovery Ventilation. HRV: Heat Recovery Ventilation.

²⁴ HFO: Hidrofluorolefinas. Usado en Refrigerantes de cuarta generación.

- R-744 (CO₂): Aplicable en sistemas de mayor capacidad aunque requiere equipos más especializados y complejos.

2. Cumplimiento normativo:

- Garantizar que los refrigerantes seleccionados cumplan con los lineamientos del Protocolo de Montreal y el Acuerdo de Kigali.
- Asegurar conformidad con normativas locales y promover opciones sostenibles adaptadas al contexto colombiano.

f) Sistemas automáticos de control

1. Sensores avanzados:

- Monitoreo en tiempo real de CO₂, PM_{2.5}, humedad relativa, temperatura y compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Sensores con precisión $\geq \pm 1\%$ para mediciones críticas.

2. Sistemas de control inteligente:

- Algoritmos predictivos que ajusten automáticamente tasas de ventilación y niveles de deshumidificación según la ocupación y las condiciones climáticas externas.
- Integración con sistemas pasivos permitiendo un trabajo híbrido optimizado.

g) Impacto técnico proyectado

1. Eficiencia energética:

- Reducción del consumo energético en sistemas de climatización en un 15% - 25% mediante recuperación de energía, uso de refrigerantes de nueva generación y control optimizado.
- Ahorro energético anual estimado de 12 - 18 kWh/m² en edificaciones institucionales.

2. Calidad Ambiental Interior (IEQ):

- Mantener niveles óptimos de contaminantes alineados con los estándares ASHRAE 62.1, promoviendo la salud y el bienestar de los ocupantes.
- Reducción significativa de la humedad relativa minimizando riesgos de formación de moho y crecimiento bacteriano.

3. Sostenibilidad: Disminución del impacto ambiental directo gracias al uso de refrigerantes con bajo GWP y sistemas de recuperación de energía.

6) *Sistemas híbridos*

Los sistemas híbridos combinan estrategias pasivas y mecánicas para optimizar el desempeño energético y mejorar la Calidad Ambiental Interior (IEQ). En climas como el de Cali, donde la humedad relativa puede descender a valores cercanos al 40% durante las horas de mayor temperatura de bulbo seco (véase Fig. 8 y Fig. 9), estos sistemas adquieren una importancia particular. En estas condiciones, las estrategias pasivas se complementan con tecnologías avanzadas como el enfriamiento evaporativo y el enfriamiento radiante para maximizar su efectividad y contribuir a las metas de sostenibilidad y eficiencia energética en las edificaciones.

A continuación se detallan los requerimientos técnicos mínimos recomendados para la implementación de sistemas híbridos junto con su impacto proyectado en el desempeño ambiental y energético de la edificación.

a) Enfriamiento evaporativo

1. Requisitos de diseño:

- Diseñar sistemas de enfriamiento evaporativo directo e indirecto considerando las condiciones específicas de Cali y priorizando las horas del día en las que la humedad relativa sea inferior al 65%.
- Diseñar las unidades para maximizar la eficiencia de evaporación con tasas de eficiencia $\geq 85\%$.

2. Materiales y configuraciones:

- Paneles evaporativos con alta capacidad de absorción y baja resistencia al flujo de aire.
- Componentes resistentes a la corrosión para ambientes húmedos.

3. Integración con estrategias pasivas: Uso combinado con ventilación natural y control solar para maximizar la disipación de calor.

b) Enfriamiento radiante

1. Requisitos de diseño:

- Diseñar sistemas de enfriamiento radiante con superficies embebidas que proporcionen una capacidad mínima de 34 W/m².
- Usar agua de enfriamiento con temperaturas superiores al punto de rocío para evitar condensaciones.

2. Materiales y configuraciones:

- Usar tuberías de polietileno reticulado (PEX) o polipropileno resistentes a la presión y temperatura.
- Sistemas compatibles con fuentes de agua de enfriamiento natural o equipos de alta eficiencia como “chillers”.

3. Automatización:

- Implementar sistemas de monitoreo con sensores integrados para medir la temperatura superficial del piso, la del aire interior y del agua de enfriamiento.
- Usar controles automáticos para ajustar el flujo de agua en función de las cargas térmicas interiores y las condiciones climáticas externas.

*c) Impacto técnico proyectado***1. Eficiencia energética:**

- Reducción del consumo energético en sistemas de climatización en un 20% - 40%.
- Ahorro anual estimado de 10 - 15 kWh/m².

2. Calidad Ambiental Interior (IEQ):

- Mejora en la distribución de temperatura lo que permite reducir las fluctuaciones y puntos de discomfort térmico.
- Contribución significativa a la reducción de contaminantes en interiores gracias a la ventilación natural asociada.
- El enfriamiento evaporativo es compatible con el enfriamiento por radiación y las ventanas abiertas. El aire frío se mantiene en la parte baja del espacio y la ventilación se da por desplazamiento hacia arriba y hacia el flujo del aire constituyendo un recambio de aire y por ende mejorando la Calidad del Aire Interior (IAQ).

3. Sostenibilidad:

- Reducción de emisiones de CO_{2e} asociadas al menor consumo energético.
- Uso eficiente de recursos hídricos y energéticos especialmente en el caso de enfriamiento evaporativo indirecto.

7) Proceso de VTE o Commissioning en el diseño de edificaciones

La Fig. 46 muestra como la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning se integra en las distintas etapas del diseño de una edificación lo que permite que cada decisión esté alineada con los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD) contribuyendo a la consecución de los objetivos definidos de eficiencia energética, Calidad Ambiental Interior (IEQ) y sostenibilidad.

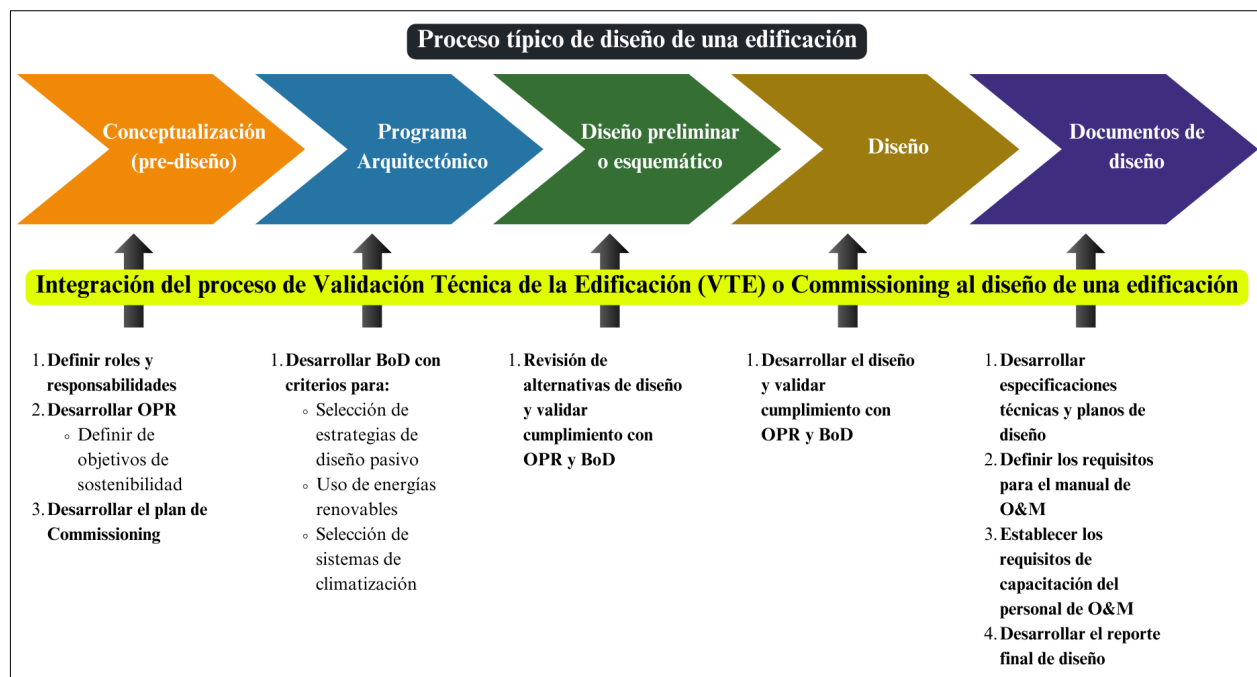


Fig. 46 Integración de actividades del proceso de Commissioning al diseño típico de una edificación

a) Conceptualización o prediseño

La etapa de conceptualización o prediseño es fundamental para establecer una adecuada planificación y ejecución del proceso de la VTE. A través de estas acciones, el prediseño de la edificación establece una base sólida para garantizar que el proyecto cumpla con los objetivos definidos en el OPR facilitando la transición a las siguientes etapas de diseño con un direccionamiento hacia el logro de alta eficiencia energética, IEQ y sostenibilidad. Los principales elementos en esta etapa incluyen:

- 1. Definir roles y responsabilidades:** Según el estándar ANSI/ASHRAE/IES 202 “*Commissioning Process for Buildings and Systems*” [77], es fundamental establecer un

equipo liderado por la Autoridad de VTE o Commissioning (AVTE). Este equipo debe incluir representantes del propietario, arquitectos, ingenieros y otros consultores clave. Cada participante debe tener claras sus funciones y responsabilidades lo que fomenta la colaboración interdisciplinaria y minimiza conflictos o inconsistencias.

2. Desarrollar los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR): El OPR es el documento directriz que traduce las metas y expectativas del propietario en criterios técnicos y funcionales específicos. Este documento establece objetivos claros de sostenibilidad, como alcanzar altos niveles de eficiencia energética, garantizar la Calidad Ambiental Interior (IEQ) y promover el uso de energías renovables. Asimismo, adapta los parámetros técnicos a las condiciones del clima de Cali y al uso institucional académico de las edificaciones de la Universidad del Valle (Univalle), asegurando su funcionalidad y relevancia. Además, documenta requisitos críticos relacionados con el confort térmico, la operación eficiente y el mantenimiento a largo plazo proporcionando una base clara para el diseño y ejecución del proyecto. A continuación se listan las metas correspondientes a cada estrategia definida anteriormente y que deben incluirse en el OPR:

- **Optimización de la envolvente y uso de recursos naturales:** Reducción del 30% - 35% en cargas térmicas.
- **Control solar:** Bloqueo del 70% - 90% de la radiación solar directa.
- **Iluminación natural:** Garantizar un Factor de Luz Día (DF) de 4% - 6%.
- **Ventilación natural:** Alcanzar tasas de ventilación ≥ 5 ACH.
- **Sistemas mecánicos complementarios:** Mantener una humedad relativa del 50% - 60%.
- **Sistemas híbridos:** Para enfriamiento evaporativo implementar sistemas con tasas de eficiencia $\geq 85\%$ y para enfriamiento radiante diseñar superficies embebidas con capacidad mínima de 34 W/m² y temperaturas de operación $\geq$ al punto de rocío. En caso de usar este tipo de sistemas se deberá evaluar el impacto y la viabilidad de tener humedad relativa mayor al 60%.

3. Elaboración del Plan de Commissioning: De acuerdo con la guía 0 de ASHRAE “*The Commissioning Process*” [79], el Plan de Commissioning o plan de VTE debe detallar las

actividades de validación y verificación que se implementarán durante las etapas de diseño, construcción y operación. Este documento como mínimo debe incluir:

- **Procedimientos de revisión y aprobación del diseño.** Se validan mediante simulaciones las estrategias y técnicas de diseño pasivo y sistemas mecánicos complementarios establecidas en el OPR.
- **Estrategias para la integración de sistemas pasivos y activos.** Se programan actividades específicas para coordinar el uso de elementos arquitectónicos, estrategias pasivas y sistemas mecánicos que garanticen su compatibilidad y eficiencia conjunta.
- **Cronograma preliminar del proceso de VTE o Commissioning.** Se definen las etapas de validación en el prediseño, diseño preliminar y detallado, así como pruebas en obra y operación para asegurar que las estrategias pasivas y mecánicas cumplan con los objetivos del proyecto.
- **Recursos necesarios para llevar a cabo el plan.** Especialistas técnicos y equipos específicos para realizar pruebas de laboratorio, simulaciones avanzadas y validaciones in sitio.

b) Programa arquitectónico

En esta etapa se continua con el desarrollo de las Bases del Diseño (BoD) donde se establecen los parámetros técnicos y funcionales que guían el diseño arquitectónico y de los demás sistemas pasivos y activos de la edificación. Este documento traduce las metas del OPR en soluciones concretas que se validan mediante simulaciones y revisiones interdisciplinarias. Los principales elementos en esta etapa son:

1. Definición técnica de estrategias:

- **Optimización de la envolvente y uso de recursos naturales.**
 - Objetivo: Reducción del 30% - 35% en cargas térmicas.
 - Especificaciones: Paredes con $R \geq 3.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ y techos con $R \geq 5.0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.
 - Indicador de desempeño: Uso de materiales con baja conductividad térmica ($\leq 0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y hermeticidad $\leq 0.5 \text{ ACH}$ bajo 50 Pa.
- **Control solar.**

- Objetivo: Bloqueo del 70% - 90% de la radiación solar directa.
- Especificaciones: Brise-soleil diseñados según ángulos solares locales (65° en Cali).
- Indicador de desempeño: Reducción de ganancias térmicas solares en un 40% - 50%.
- **Iluminación natural.**
 - Objetivo: Garantizar un Factor de Luz Día (DF) de 4% - 6%.
 - Especificaciones: Relación ventana-pared (WWR) del 30% - 40%, complementada con reflectores internos y tubos solares.
 - Indicador de desempeño: Simulaciones lumínicas que aseguren una distribución uniforme y control de deslumbramiento.
- **Ventilación natural.**
 - Objetivo: Alcanzar tasas de ventilación ≥ 5 ACH.
 - Especificaciones: Aberturas $\geq 10\%$ - 12% del área del piso, ubicadas en fachadas opuestas para ventilación cruzada.
 - Indicador de desempeño: Simulaciones CFD que validen patrones de flujo de aire y zonas críticas.
- **Sistemas mecánicos complementarios.**
 - Objetivo: Mantener una humedad relativa del 50% - 60%, disminuir la temperatura bulbo seco al mínimo posible en el rango de confort térmico, y control superficies radiantes.
 - Especificaciones: Sistemas de deshumidificación con capacidad mínima de extracción de 1.5 litros/h por cada 100 m².
 - Indicador de desempeño: Monitoreo en tiempo real de niveles de humedad mediante sensores integrados.
- **Sistemas híbridos.**
 - Objetivo: Optimizar la eficiencia energética y el confort térmico mediante la integración de tecnologías avanzadas como el enfriamiento evaporativo y el enfriamiento radiante. Es posible que la integración del enfriamiento evaporativo no permita lograr humedades relativas entre el 50% y 60% por lo que deberá evaluarse si este criterio no es relevante para el espacio donde se vaya a usar.
 - Especificaciones:
 1. Enfriamiento evaporativo:

- a. Implementar sistemas indirectos con tasas de eficiencia $\geq 85\%$.
 - b. Equipos resistentes a la corrosión diseñados para operar en condiciones de alta humedad.
 - c. Lograr integración con ventilación natural para maximizar la disipación de calor y mayor renovación de aire al interior del espacio.
2. Enfriamiento radiante:
- a. Superficies radiantes diseñadas para proporcionar una capacidad mínima de 34 W/m².
 - b. Utilizar agua de enfriamiento con temperaturas superiores al punto de rocío (18°C - 20°C) para evitar condensaciones.
 - c. Compatibilidad con fuentes de energía renovable, como paneles solares térmicos, “chillers”, y con enfriamiento y ventilación por desplazamiento.
- o Indicador de desempeño:
1. Enfriamiento evaporativo: Reducción de la temperatura del aire de suministro entre 5°C y 8°C en condiciones de alta carga térmica.
 2. Enfriamiento radiante: Mantener temperaturas interiores entre 24°C y 26°C con un flujo constante de agua fría.
 3. Ahorro energético del 20% - 30% en comparación con sistemas de climatización tradicionales.

2. Validación mediante simulaciones:

- Antes de realizar cualquier validación mediante simulaciones se deberán haber realizado los cálculos teóricos y analíticos por parte de un especialista en termodinámica, transferencia de calor y mecánica de fluidos, además de tener también conocimientos en arquitectura y bioclimática, de lo contrario los resultados de las simulaciones no tendrán relevancia técnica y académica.
- Uso de software especializado como DesignBuilder para modelar el desempeño de los elementos propuestos bajo diferentes escenarios climáticos.
- Ajustes iterativos para optimizar las estrategias antes de pasar al diseño detallado.

3. Alineación con el equipo interdisciplinario:

- Llevar a cabo reuniones técnicas para garantizar que los equipos de diseño arquitectónico, ingeniería y sostenibilidad estén alineados con los parámetros establecidos en las BoD.
- Documentar las decisiones clave para garantizar la trazabilidad del diseño.

c) Diseño preliminar o esquemático

En esta etapa se evalúan y ajustan las decisiones de diseño iniciales mediante iteraciones de los criterios establecidos en las Bases del Diseño (BoD) definidas en la etapa anterior. El objetivo es asegurar que las estrategias y técnicas pasivas y activas estén alineadas con los objetivos de eficiencia energética, IEQ y sostenibilidad definidos en el OPR. Los principales elementos en esta etapa incluyen:

1. Evaluación de alternativas arquitectónicas:

- Se comparan diferentes configuraciones espaciales y materiales mediante cálculos analíticos y teóricos, y validación con simulaciones avanzadas buscando un balance entre diseño estético y cumplimiento técnico.
- Elementos típicamente evaluados son: Control solar, ventilación natural e iluminación natural

2. Validación técnica mediante análisis teóricos, analíticos y simulaciones:

- Disciplinas como la termodinámica, transferencia de calor, mecánica de los fluidos, y otras (documentados en los ASHRAE Handbooks y Standards), deben emplearse en los cálculos y proyectos iniciales, verificados con herramientas como DesignBuilder que se utilizan para modelar escenarios climáticos reales y predecir el comportamiento térmico, energético y lumínico del edificio.
- Se realizan iteraciones para ajustar los diseños optimizando el rendimiento energético y el confort térmico según los estándares de ASHRAE 55 y 90.1.

3. Documentación de decisiones técnicas: Se genera un informe técnico consolidado con las estrategias aprobadas donde se especifican los análisis teóricos, analíticos y las simulaciones realizadas, las alternativas evaluadas y las decisiones finales. Este informe sirve como base para la siguiente etapa del diseño detallado permitiendo tener una trazabilidad de cada decisión tomada.

4. Coordinación interdisciplinaria:

- Talleres colaborativos se llevan a cabo para alinear los resultados de los cálculos teóricos y analíticos, y las simulaciones con los requisitos técnicos y funcionales de los equipos de diseño arquitectónico y de sistemas mecánicos y eléctricos principalmente.
- Las reuniones interdisciplinarias aseguran que los cambios necesarios sean implementados eficientemente y documentados correctamente.

d) Diseño

En la etapa de Diseño se consolidan las estrategias y técnicas de diseño pasivo ya activo validadas en el diseño preliminar plasmándolas en especificaciones técnicas y planos detallados de diseño. Esta fase debe garantizar que las decisiones tomadas hasta ahora se muestren adecuadamente en el proyecto y que estén cumpliendo con los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD). Los principales elementos en esta etapa son:

1. Validación técnica:

- Revisión del diseño detallado mediante herramientas teóricas y analíticas, y de simulación avanzada para garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos.
- Realización de pruebas virtuales de interacción entre sistemas pasivos y activos para identificar y solucionar posibles conflictos.

2. Definición de los requisitos del manual de operación y mantenimiento (O&M):

- Definición de directrices claras para garantizar un uso eficiente y sostenible de la edificación una vez construido.
- Documentación de los procedimientos necesarios para mantener el rendimiento óptimo de los sistemas implementados.

3. Coordinación interdisciplinaria:

- Organización de talleres con los equipos técnicos y arquitectónicos para revisar la implementación de las estrategias aprobadas.
- Generación de reportes de diseño final que incluyan todas las validaciones y decisiones tomadas.

e) Documentos de diseño

En la etapa se desarrollan y formalizan los documentos técnicos necesarios para la implementación del proyecto en la fase de construcción y operación. Estos documentos incluyen especificaciones técnicas, los requisitos para elaborar el manual de operación y mantenimiento, las directrices de capacitación y el reporte final de diseño. Los principales elementos en esta etapa incluyen:

1. Desarrollo de especificaciones técnicas y planos de diseño:

- Preparación de planos de diseño detallados que integren las estrategias validadas en las fases anteriores.
- Elaboración de especificaciones técnicas para materiales, sistemas pasivos y activos, y que cumplan con los estándares definidos en el OPR y BoD.

2. Definición de los requisitos para el manual de operación y mantenimiento (O&M):

- Definición de procedimientos específicos para el uso, monitoreo y mantenimiento de los sistemas implementados.
- Identificación de métricas para evaluar el rendimiento del edificio en operación, como consumo energético, condiciones de confort térmico e indicadores de calidad del aire interior.

3. Establecimiento de los requisitos de capacitación del personal de O&M:

- Definición de contenidos y metodologías para capacitar al personal encargado del mantenimiento de las edificaciones.
- Diseño de programas de formación que incluyan prácticas sobre el manejo de sistemas pasivos, equipos de climatización y estrategias de eficiencia energética.

4. Desarrollo del reporte final de diseño:

- Consolidación de toda la documentación técnica y los resultados de las validaciones realizadas durante el proceso de diseño.
- Preparación de un informe detallado que incluya las estrategias de sostenibilidad, las simulaciones realizadas, los sistemas seleccionados y las recomendaciones para la construcción y operación.

8) Resumen de estrategias, relación con la VTE o Commissioning e impacto esperado

El proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning se integra al diseño de edificaciones como un mecanismo para garantizar la implementación efectiva de estrategias y técnicas de diseño pasivo, eficiencia energética, Calidad Ambiental Interior (IEQ) y sostenibilidad. Este método permite verificar que cada decisión técnica esté alineada con los objetivos establecidos en los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD) lo que permite tener resultados medibles en el desempeño de la edificación.

La VTE permite estructurar las actividades de validación y optimización de las estrategias y técnicas de diseño pasivo en las distintas fases de un proyecto de diseño arquitectónico como son: prediseño, programa arquitectónico, diseño preliminar y detallado y documentación técnica. Su implementación permite que los objetivos definidos no solo sean considerados en la etapa conceptual, sino que se traduzcan en soluciones técnicas viables y eficientes.

La TABLA V presenta una guía práctica para la integración de estrategias de diseño pasivo y sistemas complementarios mediante el proceso de VTE en edificaciones institucionales académicas considerando el clima de Cali. La tabla organiza las estrategias según las fases del proceso de VTE describiendo las acciones específicas necesarias en cada etapa y los impactos esperados en términos de eficiencia energética, IEQ y sostenibilidad.

TABLA V REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE DISEÑO PASIVO Y COMMISSIONING

Estrategia	Fases del Commissioning	Acciones Específicas para el Equipo de Diseño	Resultados Esperados
Optimización de la Envoltente	- Prediseño: OPR	- Establecer requerimientos de resistencia térmica y hermeticidad en el OPR.	- Reducción de cargas térmicas.
	- Programa Arquitectónico: BoD	- Validar configuraciones de envoltente mediante simulaciones de carga térmica.	- Mejora del confort térmico y eficiencia energética.
	- Diseño Preliminar y Detallado	- Establecer como verificar hermeticidad mediante pruebas en sitio.	
Control Solar	- Prediseño: OPR	- Definir dispositivos de sombreado y estrategias de control solar en el OPR.	- Reducción de ganancias solares.
	- Programa Arquitectónico: BoD	- Ajustar diseños mediante simulaciones solares.	- Mayor confort térmico y visual.
	- Diseño Preliminar y Detallado	- Establecer como se comprobará la efectividad de dispositivos en sitio.	

Estrategia	Fases del Commissioning	Acciones Específicas para el Equipo de Diseño	Resultados Esperados
Iluminación Natural	- Prediseño: OPR - Programa Arquitectónico: BoD	- Definir estrategias de iluminación natural y dispositivos auxiliares en el OPR. - Validar distribución lumínica mediante simulaciones.	- Disminución del consumo energético por iluminación artificial.
	- Diseño Preliminar y Detallado	- Realizar mediciones de niveles de luz en campo.	- Mejora del confort visual.
	- Prediseño: OPR - Programa Arquitectónico: BoD	- Establecer estrategias de ventilación cruzada y chimeneas solares en el OPR. - Validar patrones de flujo de aire con simulaciones CFD.	- Mejora en IAQ. - Reducción del uso de sistemas de climatización.
Ventilación Natural	- Diseño Preliminar y Detallado	- Medir tasas de ventilación natural en campo.	
	- Prediseño: OPR - Programa Arquitectónico: BoD	- Incorporar sistemas de deshumidificación y recuperación de energía en el BoD.	- Incremento en la calidad ambiental interior.
	- Diseño Preliminar y Detallado	- Seleccionar refrigerantes de baja GWP.	- Reducción del impacto ambiental.
Sistemas Mecánicos Complementarios	- Diseño Preliminar y Detallado	- Validar desempeño de sistemas mediante pruebas de eficiencia.	- Operación eficiente.
	- Prediseño: OPR - Programa Arquitectónico: BoD	- Definir estrategias de integración de sistemas de enfriamiento evaporativo y radiante en el OPR.	- Reducción del consumo energético en un 20% - 30%.
	- Diseño Preliminar y Detallado	- Validar configuraciones mediante simulaciones de rendimiento térmico.	- Mejora del confort térmico (temperaturas interiores estables entre 24°C y 26°C).
Sistemas Híbridos	- Prediseño: OPR - Programa Arquitectónico: BoD	- Incorporar especificaciones técnicas en el BoD para enfriamiento evaporativo ($\geq$ 85% eficiencia) y radiante (34 W/m ² mínimo).	- Contribución a la reducción de emisiones de CO _{2e} .
	- Diseño Preliminar y Detallado	- Realizar pruebas funcionales para comprobar desempeño integrado con estrategias pasivas.	

B. Parámetros de construcción sostenible basados en Edificios Neto Cero y Commissioning

La fase de construcción es fundamental para ver materializadas las decisiones que se tomaron en el diseño de una edificación que tiene como objetivos ser sostenible, eficiente energéticamente y con una alta Calidad Ambiental Interior (IEQ), y que a su vez esté alineado con los principios de Edificaciones Neto Cero (ENC). Durante esta etapa, la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning asegura la correcta implementación de estrategias de diseño pasivo, sistemas activos y materiales definidos en los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD).

A través de actividades de coordinación y supervisión continua, pruebas funcionales y corrección de desviaciones respecto al diseño, la VTE garantiza:

- **Prácticas constructivas sostenibles:** Gestión eficiente de materiales, recursos y residuos para minimizar emisiones de CO_{2e}.
- **Cumplimiento del diseño:** Implementación precisa de estrategias pasivas, sistemas activos y uso de materiales conforme a las especificaciones.
- **Cumplimiento de la ejecución:** Supervisión y validación de la correcta instalación y configuración de sistemas mecánicos y eléctricos, como climatización, recuperación de energía, ventilación, iluminación y energías renovables asegurando que su implementación cumpla con las especificaciones técnicas del diseño y los principios de ENC.

El proceso constructivo estándar de una edificación mostrado en la Fig. 47, sigue las fases descritas en el “*Building Construction Handbook*” [80], las cuales que complementadas con buenas prácticas locales e internacionales de construcción sostenible como las promovidas por el Manual de Construcción Sostenible de Cali, el “*World Green Building Council*” y los estándares de sostenibilidad como LEED, ofrecen un marco práctico para el cumplimiento de las metas para lograr ENC. La continuidad de la implementación de la VTE en esta fase de construcción asegura que las metas de sostenibilidad, eficiencia energética e IEQ se materialicen desde la preparación del terreno hasta la puesta en marcha de la edificación.

Esta sección establece los parámetros generales de construcción sostenible que sirven como marco para incorporar estrategias alineadas con los principios de ENC y que le permitirán a la

Universidad del Valle (Univalle) hacer el tránsito hacia ENC. El proceso de VTE asegura que las estrategias pasivas y los sistemas definidos en el diseño se implementen correctamente durante la construcción contribuyendo no solo al cumplimiento de los principios de ENC, sino también a la reducción de riesgos, la mejora del desempeño energético y la minimización de costos operativos, lo que posiciona a Univalle como un referente en sostenibilidad dentro del sector educativo. Además, se detallan las actividades más relevantes de la VTE en cada fase del proceso de construcción haciendo énfasis en el valor agregado que ofrece para garantizar la aplicación de prácticas responsables y sostenibles de construcción y resultados acordes con los objetivos del proyecto. Para profundizar en estos aspectos se brindan referencias a estándares internacionales y locales para consulta adicional y profundización en este campo.

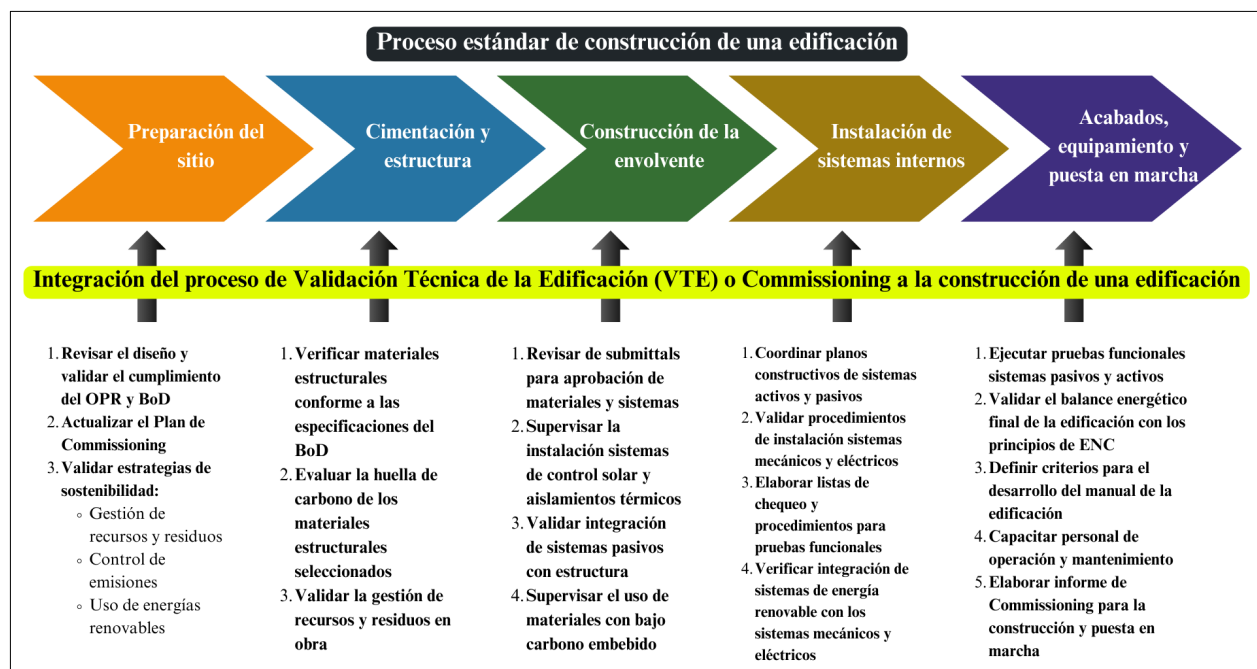


Fig. 47 Integración de actividades del proceso de Commissioning al proceso de construcción de una edificación

1) *Parámetros de construcción sostenible*

Los siguientes parámetros generales de construcción sostenible están propuestos para guiar la implementación de estrategias que promuevan la sostenibilidad, eficiencia energética y la IEQ en edificaciones que están alineadas con los principios de ENC. En cada parámetro se menciona cómo el proceso de VTE Commissioning agrega valor permitiendo que las estrategias definidas en el diseño se implementen conforme a los objetivos del proyecto. Es importante aclarar que estos

parámetros no pretenden ser una guía específica y que cada proyecto debe evaluar su contexto y necesidades particulares para determinar cuáles son aplicables y cómo pueden ser implementados de manera efectiva.

a) Gestión de emisiones en obra

Minimizar las emisiones de CO_{2e} durante la construcción implica reducir el impacto asociado al uso de maquinaria, transporte de materiales y procesos constructivos mediante estrategias sostenibles. Esto incluye la implementación de equipos de construcción eficientes energéticamente o híbridos, la optimización de rutas y métodos de transporte para disminuir emisiones de CO_{2e} y el uso de energías renovables tales como generadores eléctricos alimentados por paneles solares para actividades en sitio.

La VTE supervisa que estas estrategias se estén cumpliendo conforme a lo definido en el OPR y las BoD, valida que se haga uso eficiente de maquinaria y combustibles alternativos y verifica la instalación y operación de soluciones temporales de energía renovable para garantizar que las prácticas constructivas contribuyan a los objetivos de sostenibilidad y ENC. Para profundizar en los aspectos relacionados con la gestión de emisiones en obra se proponen dos referencias externas como son:

- **World Green Building Council: “Bringing Embodied Carbon Upfront 2019”** [81]: Este documento detalla estrategias para reducir el carbono embebido en los procesos de construcción incluyendo prácticas para minimizar emisiones en obra y transporte de materiales.
- **Manual de Construcción Sostenible de Cali, capítulo 3** [44]: Presenta directrices prácticas para mitigar emisiones durante la fase constructiva basándose en contextos urbanos colombianos.

b) Gestión de residuos en obra

Una gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición reduce el impacto ambiental y fomenta la economía circular. Esto incluye la separación en origen, reciclaje y reutilización de materiales así como la reducción de residuos no reciclables lo que contribuye a reducir el carbono embebido al minimizar la necesidad de producir y transportar nuevos materiales. La VTE valida las estrategias implementadas para el manejo de residuos, supervisa su correcta

disposición y asegura que los procedimientos cumplan con las normativas locales y los objetivos del proyecto. Para profundizar en los aspectos relacionados con la gestión de residuos en obra se proponen dos referencias externas como son:

- **World Green Building Council: “Bringing Embodied Carbon Upfront 2019”** [81]: Incluye lineamientos sobre reducción de desechos en la cadena de valor de los materiales de construcción.
- **Manual de Construcción Sostenible de Cali, capítulo 2** [44]: Aborda estrategias para la economía circular en la construcción mostrando la gestión de residuos de construcción y demolición como un eje fundamental para reducir el impacto ambiental.

c) Selección de materiales sostenibles

La selección de materiales con bajo carbono embebido, reciclables o certificados como sostenibles es fundamental para reducir el impacto ambiental durante la etapa de construcción. Esto incluye el uso de concreto de baja emisión con aditivos sostenibles, materiales locales para minimizar la huella de transporte y productos certificados lo que contribuye directamente a la reducción de las emisiones de CO_{2e} asociadas a la construcción y se alinea con las metas de ENC. La VTE verifica que los materiales seleccionados cumplan con el OPR y las BoD, supervisa su almacenamiento y manejo adecuado en el sitio y valida las certificaciones de proveedores para garantizar su sostenibilidad. Para profundizar en los aspectos relacionados con la selección de materiales sostenibles se proponen las siguientes referencias externas:

- **Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono, capítulo 3 (materiales)** [4]: Este capítulo detalla metas y acciones para reducir el impacto ambiental asociado a los materiales en el sector de la construcción enfocándose en el carbono embebido y estrategias de sostenibilidad aplicadas en Colombia.
- **Hoja de Ruta de Sostenibilidad para Materiales de Construcción, dimensión de materialidad** [82]: Este documento aborda criterios técnicos y estrategias específicas para la selección y evaluación de materiales sostenibles que fomentan la economía circular y la gestión eficiente de recursos.

- **Manual de Construcción Sostenible de Cali, capítulo 2 [44]:** Este capítulo aborda la importancia de la economía circular en la construcción promoviendo la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía e impulsando la reutilización y reciclaje como estrategias importantes para minimizar el impacto ambiental en el contexto local.

d) Gestión eficiente de recursos

Optimizar el uso de agua, energía, y materiales durante la construcción minimiza los desperdicios y promueve una construcción responsable y sostenible. Esto incluye implementar sistemas de recolección de agua de lluvia, reutilización de materiales en obra y el uso de iluminación LED de bajo consumo para el sitio.

La VTE valida que estas medidas se estén implementando, supervisa la gestión de residuos y audita el consumo de recursos para garantizar que las prácticas cumplan con los objetivos de sostenibilidad del proyecto. Para profundizar en los aspectos relacionados con la gestión eficiente de recursos se proponen las siguientes referencias externas:

- **ANSI/ASHRAE/ICC/USGBC/IES Standard 189.1: “Standard for the Design of High Performance, Green Buildings” [83]:** Este estándar internacional establece los requisitos mínimos de desempeño ambiental y eficiencia energética para edificios verdes de alto desempeño incluyendo prácticas para la gestión eficiente de recursos durante la construcción.
- **Manual de Construcción Sostenible de Cali [44]:**
 - Capítulo 2, Economía Circular: Aborda estrategias para el aprovechamiento eficiente de materiales, agua y energía promoviendo la reutilización y el reciclaje en el ciclo de vida de los materiales.
 - Capítulo 6, Agua: Presenta directrices específicas para la reducción del consumo de agua potable y el aprovechamiento de aguas lluvias y grises.
 - Capítulo 7, Eficiencia Energética: Ofrece estrategias para el uso eficiente de energía en edificaciones incluyendo herramientas de monitoreo y control que pueden aplicarse durante la construcción.

e) Validación de sistemas activos

Confirmar que los sistemas mecánicos y eléctricos instalados operen conforme al diseño es vital para garantizar su eficiencia y funcionalidad durante la operación. Esto incluye realizar pruebas funcionales en sistemas de climatización, recuperación de energía y ventilación así como validar sensores y sistemas de monitoreo y control.

La VTE coordina la ejecución de estas pruebas, supervisa la integración entre sistemas pasivos y activos y genera un reporte de conformidad que garantiza que los sistemas cumplan con las especificaciones definidas en el OPR y las BoD. Para profundizar en los aspectos relacionados con la validación de sistemas activos se proponen las siguientes referencias:

- **ASHRAE Standard 202: “Commissioning Process for Buildings and Systems”** [77]: Este estándar establece un marco detallado para la ejecución del proceso de VTE o Commissioning en edificaciones y sistemas abarcando todas las etapas desde el prediseño hasta la operación.
- **ASHRAE Guideline 0: “The Commissioning Process”** [79]: Esta guía proporciona principios generales y un enfoque sistemático para implementar el estándar ASHRAE 202 incluyendo procedimientos detallados para la validación de sistemas activos y su respectiva integración con el proceso de construcción de la edificación.

f) Control de calidad en obra

El control de calidad en obra en una edificación que aspira a ser ENC y que implementa el proceso de VTE o Commissioning se enfoca en garantizar que las prácticas constructivas y los sistemas instalados cumplan con los estándares de sostenibilidad definidos en el OPR y las BoD. Este proceso no solo verifica que la ejecución esté conforme al diseño, sino que también asegura que la calidad de los materiales, los métodos de construcción y la instalación de sistemas sean consistentes con los objetivos de desempeño energético, emisiones de CO_{2e} y funcionalidad esperados.

El control de calidad para sistemas pasivos por ejemplo, incluye la validación de aislamientos térmicos, juntas herméticas y elementos de control solar mediante pruebas de estanqueidad y análisis de termografías que identifican posibles fallas en la envolvente de la edificación, mientras que para los sistemas activos se inspeccionan las conexiones, la instalación y las pruebas funcionales iniciales de sistemas mecánicos y eléctricos, como climatización,

iluminación y automatización. También se verifica la integración entre sistemas pasivos y activos para garantizar que trabajen en conjunto y maximicen la eficiencia energética y la Calidad Ambiental Interior (IEQ).

Finalmente, este proceso incluye la emisión de informes detallados que certifiquen la calidad de la ejecución y registren las actividades realizadas, lo que permite llevar una trazabilidad y realizar las correcciones necesarias. Todo esto se puede realizar dentro del marco de la VTE o Commissioning, que asegura un control de calidad continuo desde el diseño hasta la puesta en marcha de la edificación. Para profundizar en los aspectos relacionados con el control de calidad en obra apoyados por el proceso de VTE o Commissioning se puede optar por seguir lo propuesto en el estándar 202 y la Guía 0 de ASHRAE.

g) Gestión del impacto en el entorno urbano y natural

Garantizar que la edificación minimice su impacto en el entorno urbano y natural es fundamental para un proceso de construcción responsable y sostenible. Esto incluye la preservación de áreas verdes, la mitigación de islas de calor mediante el uso de techos y fachadas verdes y la implementación de sistemas de gestión de aguas pluviales que reduzcan el riesgo de inundaciones y mejoren la calidad del agua. Además, se pueden integrar estrategias de paisajismo sostenible para mejorar la biodiversidad urbana y aumentar el confort térmico de las áreas circundantes como con la siembra de especies nativas y el diseño de espacios verdes funcionales.

La VTE valida que las estrategias implementadas respeten los principios de sostenibilidad ambiental y contribuyan a la mejora del entorno. Para profundizar en los aspectos relacionados con la gestión del impacto en el entorno urbano y natural se proponen las siguientes referencias:

- **Manual de Construcción Sostenible de Cali, capítulo 6** [44]: Ofrece directrices para la gestión sostenible de áreas verdes, el manejo de aguas pluviales y estrategias para reducir el impacto ambiental en contextos urbanos.
- **Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono, capítulo 5** [4]: Detalla acciones y estrategias para garantizar que las edificaciones contribuyan positivamente al entorno urbano y natural.
- **Libro Árboles de la Universidad del Valle** [84]: Describe la riqueza florística del campus universitario a partir de un conjunto de fichas técnicas botánico-paisajistas ilustradas, que

proporcionan la información sobre las características, propiedades, usos, funciones paisajísticas y recomendaciones para la reproducción y el tratamiento de los árboles que identifican el paisaje de la Universidad del Valle.

- **Tesis de Maestría Manejo de la Arborización en el Control Climático** [85]: Documento que relaciona y caracteriza los árboles que pueden ser seleccionados para el uso del espacio público en Cali, en cuanto a la producción de microclimas y de condiciones perceptuales positivas con lo cual es posible proporcionar confort térmico y bienestar humano.

h) Formación de trabajadores de obra en sostenibilidad

Garantizar la capacitación del personal de obra en prácticas de construcción sostenible que incluya la formación en manejo adecuado de residuos, ahorro de recursos como agua y energía, uso eficiente de materiales sostenibles y adopción de tecnologías que mejoren el desempeño ambiental. Estas capacitaciones no solo promueven el cumplimiento de los objetivos del proyecto sino que también contribuyen al fortalecimiento de la cultura de sostenibilidad en la construcción. La VTE brinda el soporte para llevar a cabo lo establecido en la fase de diseño en cuanto a capacitación, no solo del personal de operación y mantenimiento, sino del personal de obra a cargo de la construcción de la edificación.

2) Rol de la VTE o Commissioning en la fase de construcción de una edificación

La Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning es un proceso integral y continuo que asegura que cada actividad durante la construcción esté alineada con los objetivos establecidos en los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD). Su propósito principal es garantizar que las estrategias definidas en el diseño, los materiales seleccionados y los sistemas instalados cumplan con los estándares de sostenibilidad, eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ) alineándose con los principios de Edificaciones Neto Cero (ENC).

En la fase de construcción, la VTE se integra a cada etapa del proceso de construcción estándar de una edificación como se muestra en la Fig. 47. Este proceso asegura la correcta implementación de estrategias pasivas, sistemas activos y materiales sostenibles además de validar que la ejecución cumpla con las especificaciones técnicas del proyecto. Al ser un proceso continuo,

la VTE facilita la identificación temprana de problemas o errores y permite la implementación de correcciones rápidas que evitan sobrecostos y garantizan la calidad del proyecto.

A continuación se describen las principales actividades de la VTE en cada etapa, siguiendo los lineamientos establecidos en el estándar 202 y la Guía 0 de ASHRAE.

a) Revisión de los documentos de construcción

La Autoridad de VTE o Commissioning (AVTE) verifica que los documentos de construcción incluidos los planos y las especificaciones cumplan con el OPR y las BoD haciendo énfasis en sistemas críticos como los de climatización, iluminación, energías renovables y la envolvente de la edificación. Como parte de este proceso, la AVTE realiza observaciones técnicas al equipo de diseño y construcción con el objetivo de alinear los detalles del proyecto con los objetivos establecidos para ENC asegurando que las estrategias definidas en el diseño puedan implementarse de manera efectiva durante la construcción.

b) Preparación del sitio

En esta etapa la AVTE organiza reuniones iniciales “*kick-off meetings*” con los equipos de diseño, construcción y operación para coordinar el proceso de VTE, confirmar roles y responsabilidades y establecer una comunicación efectiva entre todos los participantes. Durante estas reuniones se garantiza que las expectativas y objetivos del proyecto estén claramente comprendidos por todos los involucrados.

Adicionalmente, la AVTE actualiza el Plan de VTE o Commissioning para ajustarlo a las condiciones específicas del sitio y las necesidades particulares de la obra permitiendo que las actividades de validación se integren adecuadamente al cronograma de ejecución de obra. También, la AVTE verifica la implementación de estrategias iniciales relevantes, tales como la gestión responsable de residuos de obra, la aplicación de medidas de control de emisiones de CO_{2e} y el uso de energías renovables temporales en el sitio las cuales contribuyen a reducir el impacto ambiental desde las primeras etapas de ejecución del proyecto.

c) Estructura y envolvente de la edificación

En esta etapa la AVTE supervisa la construcción de la estructura y la instalación de la envolvente de la edificación verificando la correcta implementación de sistemas pasivos, como el

aislamiento térmico, las juntas herméticas y los elementos de control solar. Estas actividades son validadas mediante inspecciones en campo utilizando listas de verificación prefuncionales que permiten identificar desviaciones respecto a las especificaciones definidas en las Bases del Diseño (BoD) y corregirlas de manera oportuna para garantizar la calidad de la ejecución. Este proceso garantiza que la envolvente de la edificación cumpla con los estándares de calidad que permiten tener un óptimo desempeño térmico para reducir pérdidas energéticas, aspectos que son relevantes para los objetivos de sostenibilidad y eficiencia de Edificaciones Neto Cero (ENC).

Adicionalmente, la AVTE revisa los “*submittals*” o fichas técnicas correspondientes a los materiales y componentes de la envolvente asegurándose que cumplan con los estándares técnicos definidos en las BoD y que respalden los objetivos de sostenibilidad del proyecto. En algunos casos, se pueden coordinar y supervisar pruebas de fábrica “*Factory Acceptance Tests*” para validar el desempeño de equipos o componentes críticos antes de su instalación lo que permite minimizar los riesgos durante la ejecución y de esta manera incrementar la confiabilidad del proyecto.

d) Instalación de sistemas internos

En esta etapa la AVTE juega un papel crucial coordinando y supervisando la instalación de los sistemas activos como los de climatización, iluminación, energías renovables y automatización. Estas actividades buscan asegurar que los sistemas se instalen de manera correcta y conforme a las especificaciones definidas en las BoD. La AVTE utiliza herramientas y metodologías específicas para garantizar la conformidad técnica y el desempeño esperado siguiendo los principios establecidos en el estándar 202 y la Guía 0 de ASHARE.

Dentro de las inspecciones en campo que realiza la AVTE para validar que los procedimientos de instalación cumplan con los estándares técnicos y las mejores prácticas se incluyen:

- **Inspección física de sistemas y componentes:** Verificar la correcta instalación de conductos, tuberías, equipos de climatización, luminarias y paneles solares validando su ubicación e instalación conforme al diseño.

- **Revisión de fichas técnicas y certificaciones:** Asegurar que los materiales y equipos instalados cuenten con certificaciones que respalden su eficiencia y sostenibilidad lo cual permite que se cumpla con los objetivos para Edificaciones Neto Cero (ENC).
- **Supervisión de conexiones y ensamblajes:** Validar que las conexiones eléctricas, mecánicas e hidráulicas se realicen correctamente lo que minimiza riesgos de fallos y asegura la seguridad en la operación de los sistemas.

Previo a la puesta en marcha de los sistemas instalados, la AVTE coordina y supervisa pruebas prefuncionales las cuales verifican que los sistemas estén listos para ser probados en condiciones operativas. Estas pruebas incluyen:

- **Revisión de controles y ajustes iniciales:** Confirmar que las configuraciones iniciales de los sistemas de automatización (como termostatos, controles de iluminación y software de monitoreo) estén acordes con las especificaciones.
- **Validación de ajustes mecánicos:** Verificar el balanceo inicial de sistemas de climatización para asegurar que los caudales de aire y agua corresponden a lo especificado en el diseño.
- **Inspección de sellos y aislamiento:** Garantizar que los sistemas activos no tengan fugas que puedan afectar su desempeño o la integridad de la edificación.

Una vez completas las pruebas prefuncionales la AVTE desarrolla protocolos detallados para las pruebas de desempeño funcional “*Functional Performance Tests*” con el objetivo que los sistemas instalados operen conforme a los criterios establecidos en las BoD. Estas pruebas son fundamentales para evaluar la interacción de los sistemas activos entre sí y con las estrategias pasivas y pueden incluir:

- **Pruebas de sistemas de climatización:** Evaluar el flujo de aire, control de temperatura y desempeño de los sistemas de climatización bajo condiciones simuladas de operación a carga completa y carga parcial.
- **Pruebas de control de iluminación:** Validar la integración de sistemas de iluminación con sensores de ocupación y controles automáticos.

- **Evaluación de energías renovables:** Verificar la conexión, funcionalidad y capacidad de producción de sistemas como paneles solares garantizando que se puedan integrar fácilmente con los sistemas eléctricos existentes.
- **Pruebas de sistema de automatización:** Confirmar que los sistemas de control respondan adecuadamente a los comandos programados y que puedan ajustarse a las secuencias de operación establecidas.

Con la finalización de las pruebas prefuncionales, la AVTE asegura que los sistemas activos estén físicamente completos y listos para la pruebas funcionales en condiciones operativas durante la siguiente fase de puesta en marcha.

e) Acabados, equipamiento y puesta en marcha

En la fase final de construcción la AVTE coordina las actividades de integración y puesta en marcha de los sistemas activos asegurándose que su interacción con las estrategias pasivas sea efectiva. Esto incluye ajustes finales y pruebas funcionales que garantizan la operación eficiente de la edificación conforme a los principios de ENC.

En esta etapa la AVTE realiza inspecciones detalladas para verificar que los acabados interiores y exteriores así como los equipos instalados se ajusten a las especificaciones de diseño. Este proceso incluye:

- **Verificación de materiales y acabados:** Validar que los acabados utilizados sean consistentes con las especificaciones técnicas priorizando su sostenibilidad y durabilidad.
- **Inspección de equipamiento final:** Supervisar la instalación de luminarias, sensores, controles de automatización y otros elementos finales, asegurando su funcionalidad y compatibilidad con los sistemas principales.

También se realizan actividades de puesta en marcha de los sistemas instalados con el objetivo de que estén listos para operar de manera eficiente y conforme a las secuencias operativas establecidas en las BoD. Las actividades más relevantes incluyen:

- **Pruebas finales de integración:** Validar que los sistemas activos como climatización, iluminación y automatización operen de manera integrada con las estrategias pasivas.
- **Ajustes finales y balanceo “*Testing, Adjusting, and Balancing – TAB*”:** Supervisar la calibración de sistemas que permitan tener los caudales de aire y agua requeridos para garantizar que los sistemas mecánicos y eléctricos funcionen de manera óptima.
- **Calibración de sensores y controles:** Asegurar que los sistemas de monitoreo y control respondan correctamente a las configuraciones definidas en el diseño.

Adicionalmente, la AVTE coordina el desarrollo y entrega de la documentación técnica del proyecto y organiza capacitaciones para preparar al personal de operación y mantenimiento de la edificación. Estas actividades incluyen:

- **Manuales de operación y mantenimiento (O&M):** Establecer los lineamientos para que los contratistas desarrollen todos los documentos necesarios para describir el funcionamiento y el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas instalados.
- **Sesiones de capacitación:** Coordinar y programar sesiones de formación al personal operativo para garantizar que comprendan cómo gestionar eficientemente los sistemas y mantener su desempeño.

Finalmente, la AVTE registra todos los hallazgos en informes técnicos detallados, identificando desviaciones respecto a las especificaciones del diseño y coordinando con los contratistas las acciones correctivas necesarias para garantizar que los sistemas activos cumplan con los objetivos de sostenibilidad, eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ) establecidos en el proyecto. En este punto se espera que los sistemas activos estén completamente listos para su puesta en marcha, lo que incluye la realización de ajustes finales y el balanceo de sistemas mecánicos, eléctricos e hidráulicos, asegurando que operen de manera eficiente durante las fases finales de construcción y en su transición hacia la operación inicial.

3) Resumen de parámetros de construcción sostenible, relación con la VTE y su impacto esperado

El proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning es fundamental durante la fase de construcción ya que permite asegurar que las estrategias de sostenibilidad, los sistemas pasivos y activos y los materiales seleccionados sean implementados conforme a los objetivos definidos en el diseño. Su integración permite garantizar que las prácticas constructivas se alineen con los principios de Edificaciones Neto Cero (ENC) lo que genera resultados medibles en términos de sostenibilidad, eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ).

La TABLA VI presenta una síntesis de cómo los parámetros de construcción sostenible se integran con las actividades de la VTE dentro de las fases estándar de construcción de una edificación. La tabla organiza los parámetros, describe las acciones específicas realizadas por la Autoridad de Validación Técnica (AVTE) en cada fase y muestra los impactos esperados en términos de emisiones de CO_{2e} y desempeño energético de la edificación.

TABLA VI PARAMETROS DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE INTEGRADOS CON COMMISSIONING PARA LOGRAR ENC

Parámetro de Construcción Sostenible	Fase del Proceso Constructivo	Actividades del Commissioning	Resultados Esperados
Gestión de emisiones en obra	- Inicio de obra	- Verificar que las rutas de transporte y maquinaria cumplan con los objetivos de sostenibilidad y ENC.	- Reducción de emisiones operativas de CO _{2e} .
	- Estructura y Envolvente	- Supervisar el uso de energías renovables temporales.	- Optimización de recursos durante la construcción.
Gestión de residuos en obra	- Estructura y Envolvente	- Supervisar cumplimiento de los procedimientos de manejo de residuos establecidos en el BoD.	- Reducción del carbono embebido asociado a residuos.
	- Instalación de Sistemas	- Validar separación en origen y reciclaje en campo.	- Minimización de materiales enviados a disposición final.
Selección de materiales sostenibles	- Inicio de obra	- Revisar certificaciones de materiales según OPR y BoD.	- Reducción de carbono embebido.
	- Estructura y Envolvente	- Supervisar almacenamiento y	- Promoción de la economía circular mediante el uso eficiente

Parámetro de Construcción Sostenible	Fase del Proceso Constructivo	Actividades del Commissioning	Resultados Esperados
		manejo conforme a BoD y especificaciones de fabricantes.	de recursos y reducción de desechos.
Gestión eficiente de recursos	- Instalación de Sistemas	- Validar instalación de sistemas de ahorro de agua y energía.	- Reducción del consumo operativo de agua y energía.
	- Puesta en Marcha	- Coordinar y supervisar pruebas iniciales de desempeño energético.	- Optimización de recursos en obra y operación.
Validación de sistemas activos	- Instalación de Sistemas	- Coordinar pruebas prefuncionales de climatización, iluminación y control.	- Mejora del desempeño energético.
	- Puesta en Marcha	- Coordinar y validar las pruebas funcionales.	- Garantía de funcionalidad según diseño.
Control de calidad en obra	- Estructura y Envolvente	- Inspeccionar sistemas pasivos y activos.	- Mejora de la eficiencia energética.
	- Instalación de Sistemas	- Validar instalación mediante listas de verificación.	- Reducción de fallas constructivas.
Impacto en el entorno urbano y natural	- Estructura y Envolvente	- Supervisar estrategias de mitigación de islas de calor.	- Contribución al confort térmico urbano.
	- Puesta en Marcha	- Validar gestión de aguas pluviales.	- Mejora de la biodiversidad local.
Formación en sostenibilidad	- Inicio de obra	- Coordinar capacitaciones para manejo de residuos y prácticas sostenibles.	- Fomento de la cultura de sostenibilidad.
	- Instalación de Sistemas	- Validar la ejecución de actividades de formación.	- Mejora en las prácticas constructivas.

C. Lineamientos para una operación de edificaciones energéticamente eficientes basados en Edificios Cero Energía y Commissioning

El desempeño a largo plazo de las edificaciones energéticamente eficientes y de alto desempeño no solo depende de su diseño y construcción, sino también de la implementación de programas efectivos de operación y mantenimiento (O&M) que aseguren su funcionalidad y

sostenibilidad [29]. La efectividad de las estrategias de diseño y construcción de edificaciones sostenibles se mide finalmente en su fase de operación. Durante este periodo, las edificaciones deben demostrar su capacidad para cumplir con los estándares de Edificaciones Cero Energía (ECE) y Edificaciones Neto Cero (ENC), así como alcanzar una alta Calidad Ambiental Interior (IEQ) con unos costos razonables de operación y mantenimiento.

En esta sección presentamos los lineamientos de operación y mantenimiento que aseguran que las edificaciones, tanto nuevas como existentes, alcancen y mantengan estos elevados estándares a lo largo de su ciclo de vida operativo. Para las edificaciones nuevas, se parte del supuesto de que han cumplido con los lineamientos y parámetros establecidos en las secciones A y B de diseño y construcción y que están preparadas para implementar de manera inmediata los lineamientos de operación eficiente propuestos en esta sección. Para evaluar el desempeño energético de las edificaciones y asegurar su alineación con los estándares de ENC y ECE, se propone el uso del programa bEQ de ASHRAE el cual permite establecer líneas base de consumo energético y emisiones (kWh/m² y tCO_{2e}) en edificaciones existentes y validar el cumplimiento de las metas de diseño en edificaciones nuevas que entran en operación. Además, el uso de bEQ garantiza la identificación de ineficiencias, la implementación de estrategias de mejora, el monitoreo continuo y la validación de condiciones de IEQ.

Se hará énfasis en el valor agregado que ofrece la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning para la optimización continua de la operación mostrando como este proceso es relevante para convertir los beneficios del diseño y construcción sostenible en resultados operativos reales y rentables. En esta fase de operación, se tienen en cuenta conceptos específicos como el “*retrocommissioning*” que consiste en actividades de VTE aplicadas a edificaciones existentes que no contaron con un proceso de VTE durante su diseño y construcción. Por otro lado, el “*recommissioning*” que se refiere a las actividades de VTE realizadas en edificaciones o sistemas que ya tuvieron un proceso de VTE durante su diseño, construcción y puesta en marcha garantizando que continúen operando conforme a los objetivos originales del proyecto. Ambos procesos son liderados por la Autoridad de Commissioning o VTE (AVTE) quien coordina pruebas funcionales y revisiones completas para ajustar y optimizar los sistemas activos y pasivos. En edificaciones existentes, la AVTE identifica ineficiencias y propone soluciones específicas mientras que en edificaciones nuevas, verifica que el desempeño de la edificación cumpla con las metas definidas en el OPR y las BoD.

La estructura propuesta se resume en la Fig. 48 la cual representa las cinco etapas del proceso de implementación de los dieciséis lineamientos de operación eficiente para cualquier edificación en operación. Esta imagen muestra cómo la integración de la VTE o Commissioning contribuye al cumplimiento de los objetivos de ECE, ENC e IEQ, independientemente de si la edificación es nueva o existente. Asimismo, se incluye una tabla sobre el final de la sección que resume y detalla los lineamientos presentados en sus respectivas fases de implementación.

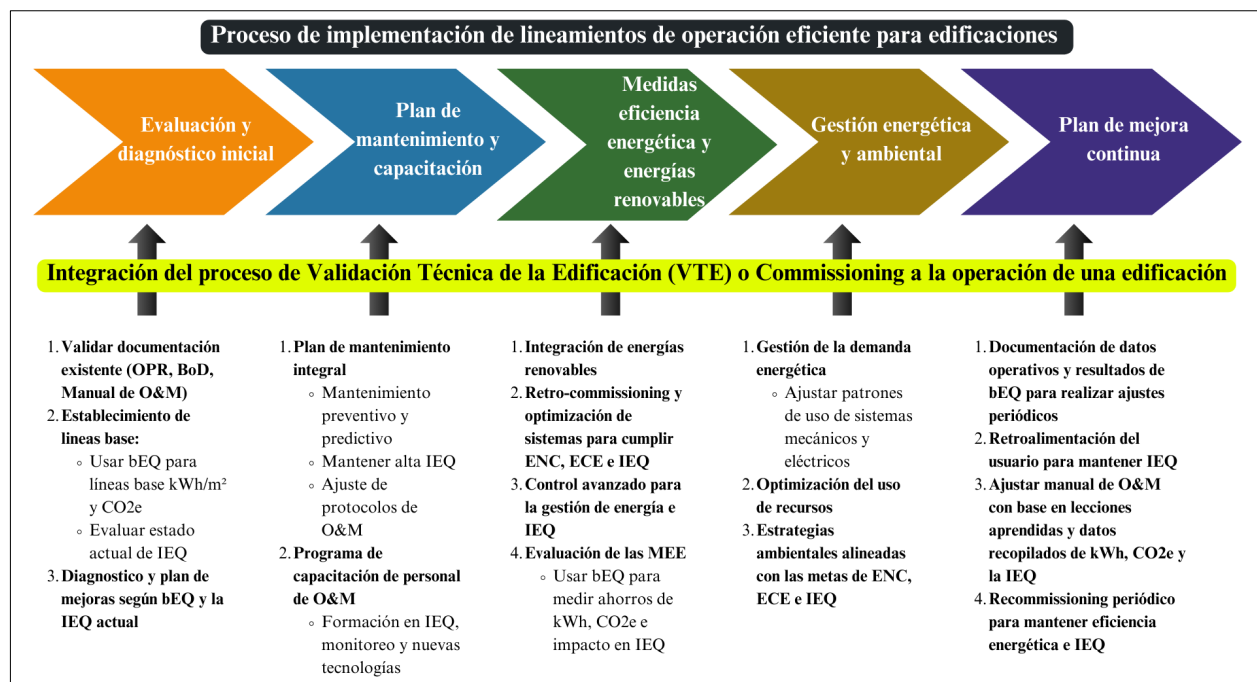


Fig. 48 Integración lineamientos de operación eficiente de una edificación a través del Commissioning

1) Fases de implementación de lineamientos de operación eficiente de edificaciones

El proceso de implementación de los lineamientos para la operación eficiente de edificaciones está diseñado para garantizar un desempeño energético y ambiental de alto nivel que responda a las necesidades de Edificaciones Cero Energía (ECE), Edificaciones Neto Cero (ENC) y Calidad Ambiental Interior (IEQ). En edificaciones existentes, se hace énfasis en el diagnóstico energético inicial, la identificación de ineficiencias y la definición de estrategias de mejora que permitan una transición hacia estándares más sostenibles. Por otra parte, las edificaciones nuevas deben garantizar que las metas de diseño se validen y ajusten según su desempeño real al entrar en operación. Este proceso incluye herramientas avanzadas como bEQ de ASHRAE que permite establecer líneas base de consumo energético y emisiones así como validar condiciones de IEQ y

monitorear las mejoras que se implementen. Además, la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning se involucra como un eje transversal en cada etapa que asegura la correcta implementación y optimización de las estrategias propuestas.

A continuación, se describen las cinco fases del proceso basadas en la Fig. 48 donde se presenta una estructura de operación progresiva y alineada con las mejores prácticas para lograr edificaciones de alto desempeño. Cada fase incluye lineamientos y estrategias técnicas que contribuyen al logro de metas sostenibilidad, eficiencia energética calidad ambiental interior en edificaciones nuevas y existentes.

a) Evaluación y diagnóstico inicial

La fase 1 establece las condiciones base de la edificación en términos de consumo energético, emisiones de CO_{2e} e IEQ. Para edificaciones existentes, el objetivo es diagnosticar el estado actual, identificar ineficiencias y definir un plan de mejoras, a través de actividades de retrocommissioning que permiten evaluar y optimizar sistemas que no fueron sometidos previamente a un proceso de VTE. Para edificaciones nuevas, se busca validar que el desempeño en la operación cumpla con las metas definidas en el diseño y la construcción mediante el recommissioning el cual garantiza que la edificación y sus sistemas sigan funcionando bajo los criterios establecidos en el OPR y BoD.

1. Validación de documentación existente. Para garantizar que documentos como los Requerimientos del propietario del Proyecto (OPR), las Bases del Diseño (BoD) y el Manual de O&M estén alineados con las metas de ENC, ECE e IEQ, es necesario revisar y analizar los documentos existentes, realizar reuniones con el propietario y el equipo de operación para ajustar objetivos y asegurarse de que estén mostrando las condiciones reales de operación. Este lineamiento asegura que las estrategias pasivas y activas planificadas durante el diseño sean documentadas y validadas para facilitar su implementación y mantenimiento.

Edificaciones Existentes:

- Revisar y ajustar el OPR para mostrar las metas actualizadas relacionadas con sostenibilidad, eficiencia energética e IEQ.

- Evaluar el BoD y el Manual de O&M para confirmar que estén reflejando las condiciones actuales y las necesidades de operación y mantenimiento.
- Crear el documento CFR “*Current Facility Requirements*”, el cual toma como base el OPR para establecer los requerimientos de operación actuales de la edificación.

Edificaciones Nuevas:

- Validar que el OPR y el BoD fueron cumplidos durante el diseño y construcción.
- Verificar que el Manual de O&M documente adecuadamente los sistemas instalados y sus configuraciones iniciales, reflejando las estrategias propuestas para el inicio de la operación.

2. Definición de líneas base. Para definir las líneas base de referencia de consumo energético, emisiones de CO_{2e} y métricas de IEQ que servirán para medir el progreso hacia el balance energético Neto Cero y la evaluación de mejoras, es necesario recopilar y analizar datos relacionados con la operación de la edificación, realizar auditorías energéticas para complementar las mediciones y comparar los resultados (“*benchmarking*”) con referencias normativas nacionales o internacionales y los objetivos de diseño. Este proceso también incluye el análisis de sistemas activos y pasivos para garantizar que ambos trabajen en conjunto para alcanzar las metas de sostenibilidad e IEQ.

Edificaciones Existentes:

- Usar bEQ “*In Operation*” para medir el desempeño actual y establecer líneas base de:
 - Consumo energético: kWh/m².
 - Emisiones: tCO_{2e}.
 - IEQ: temperatura (24°C - 26°C), humedad relativa (40 - 60%) y CO₂ (< 800 ppm).
- Identificar diferencias en relación con las referencias normativas de edificaciones similares para establecer planes de mejora.

Edificaciones Nuevas:

- Comparar los resultados de bEQ “*In Operation*” con bEQ “*As Designed*” para validar que el desempeño en operación cumple con las metas definidas en el diseño.

- Asegurar que las condiciones de IEQ en operación (temperatura, humedad relativa y calidad del aire) coincidan con las establecidas en el diseño y construcción.
- Validar el desempeño de los sistemas pasivos instalados durante el diseño para corroborar que estén complementando las estrategias activas para minimizar el consumo energético y mantener las condiciones de IEQ.

3. Diagnóstico y plan de mejoras. Para identificar inefficiencias en los sistemas de la edificación y desarrollar un plan de acción que optimice su desempeño es necesario analizar el estado actual de los sistemas más relevantes como los de climatización, iluminación y automatización, y de esta manera evaluar su impacto en el cumplimiento de las metas de ENC, ECE e IEQ.

Edificaciones Existentes:

- Analizar sistemas como los de climatización, iluminación y automatización para identificar problemas de operación que impacten el consumo energético y las condiciones de IEQ.
- Evaluar cómo las inefficiencias afectan las metas de ENC, ECE y las métricas de IEQ.
- Priorizar acciones de mejora en tres niveles:
 - Ajustes inmediatos: Configuración de horarios, calibración de equipos y optimización de planes de operación y mantenimiento.
 - Medidas a mediano plazo: Reemplazo de componentes obsoletos o de baja eficiencia al igual que sistemas que requieran actualización del tipo de refrigerante.
 - Estrategias a largo plazo: Integración de tecnologías avanzadas o energías renovables para mejorar la eficiencia energética.
- Analizar el estado y efectividad de estrategias pasivas como la protección solar, la ventilación natural y los materiales aislantes y reflectantes. Incluir estos elementos en el plan de mejoras dándole prioridad a las acciones que reduzcan la carga térmica y optimicen el consumo energético.

Edificaciones Nuevas:

- Validar que los sistemas instalados operen dentro de establecido en el OPR y BoD.
- Ajustar configuraciones iniciales de los sistemas de climatización, iluminación y automatización para maximizar su eficiencia energética.

- Generar un informe técnico que documente las diferencias encontradas, las acciones correctivas realizadas y los ajustes necesarios para alinearse con las metas de ENC, ECE e IEQ.

b) Plan de mantenimiento y capacitación

La fase 2 se centra en garantizar que las edificaciones operen de manera eficiente y sostenible mediante un mantenimiento planificado y la capacitación del personal de O&M. Para edificaciones existentes, el objetivo es establecer un programa de mantenimiento preventivo y predictivo basado en las condiciones actuales mientras que para edificaciones nuevas, se busca implementar procedimientos acordes con los estándares definidos en las etapas de diseño y construcción. Además, la formación del personal de O&M es crucial para asegurar que los sistemas sean administrados de manera eficiente para mantener los estándares de Edificaciones Neto Cero (ENC), Edificaciones Cero Energía (ECE) y Calidad Ambiental Interior (IEQ).

El desarrollo de estas estrategias puede apoyarse en las directrices técnicas desarrolladas en el documento de ASHRAE “*Fundamentals of Building Operation, Maintenance, and Management*” [86], que resalta la importancia de pasar de actividades reactivas a proactivas en el mantenimiento, hacer uso de Sistemas de Gestión de Mantenimiento Computarizados (CMMS, por sus siglas en inglés) para optimizar la programación y seguimiento de tareas y documentar de manera precisa y actualizada los sistemas y actividades de mantenimiento. También, de manera más específica está el estándar ASHRAE 180 “*Standard Practice for Inspection and Maintenance of Commercial Building HVAC Systems*” [87], que establece prácticas recomendadas para la inspección y mantenimiento de sistemas de climatización con el objetivo de asegurar su máxima eficiencia energética y cumplimiento de las metas de IEQ.

1. Desarrollo del plan de mantenimiento. Para garantizar un alto desempeño de la edificación alineado con los objetivos de ECE y unas buenas condiciones de IEQ es importante desarrollar un plan de mantenimiento integral que incluya acciones preventivas y predictivas. Validar que los planes de mantenimiento incluyan estrategias para mantener el balance energético y optimizar la operación de sistemas activos y pasivos es fundamental para reducir la demanda energética.

Edificaciones Existentes:

- Diseñar un plan basado en las necesidades de operación actuales considerando los hallazgos del diagnóstico inicial.
- Priorizar sistemas críticos como los de climatización, iluminación y automatización para evitar fallos y garantizar el cumplimiento de los estándares de IEQ.
- Incorporar actividades específicas de retrocommissioning para recalibrar sistemas y asegurar su correcto funcionamiento.

Edificaciones Nuevas:

- Implementar el plan de mantenimiento definido en el Manual de O&M corroborando que esté cumpliendo con lo definido en el OPR y las BoD.
- Incluir actividades de recommissioning periódicas para garantizar que los sistemas continúen operando según los parámetros de diseño.

2. **Capacitación del personal de O&M.** La formación del personal es relevante para garantizar que la edificación y sus sistemas sean administrados de manera eficiente y sostenible. La Autoridad de VTE o Commissioning (AVTE) coordina los programas de formación para garantizar que el personal de O&M esté capacitado para gestionar adecuadamente los sistemas pasivos y activos que garanticen el cumplimiento de los objetivos de ECE e IEQ.

Edificaciones Existentes:

- Diseñar programas de capacitación con énfasis en el uso eficiente de recursos y el mantenimiento de condiciones de IEQ para la operación y mantenimiento de sistemas instalados previamente que no cumplen con los estándares actuales de eficiencia o IEQ.
- Capacitar en la implementación de herramientas avanzadas como sistemas de gestión de edificaciones “*Building Management Systems*” (BMS, por sus siglas en inglés) y auditorías energéticas.

Edificaciones Nuevas:

- Capacitar al personal en el manejo de tecnologías y sistemas avanzados instalados durante el diseño y construcción.

- Incluir módulos sobre el seguimiento de indicadores clave de desempeño como consumo energético, emisiones de CO_{2e} y métricas de IEQ.

c) Medidas de eficiencia energética y energías renovables

La fase 3 se centra en la implementación de estrategias que optimicen el desempeño energético y reduzcan el impacto ambiental de las edificaciones combinando Medidas de Eficiencia Energética (MEE) y la integración de tecnologías de energías renovables. Para edificaciones existentes, el objetivo está en ajustar y actualizar sistemas mediante actividades de retrocommissioning mientras que para edificaciones nuevas se busca validar el desempeño de los sistemas instalados durante el diseño y construcción. Esta fase permite que las tecnologías activas trabajen de manera complementaria con los sistemas pasivos, para sacar el mayor beneficio en términos de ahorro energético y contribuyendo al cumplimiento de las metas de ENC, ECE e IEQ.

1. Optimización de sistemas existentes. La implementación de medidas de eficiencia energética (MEE) permite mejorar el desempeño de los sistemas más importantes de las edificaciones adaptándose según sus necesidades específicas.

Edificaciones Existentes:

- Realizar actividades de retrocommissioning para identificar y corregir ineficiencias en sistemas como los de climatización, iluminación y automatización.
- Recalibrar y ajustar equipos para optimizar su operación y que de esta manera permitan reducir el consumo energético sin comprometer la IEQ.
- Evaluar el uso de elementos pasivos como aberturas para ventilación natural y control solar que permitan reducir la dependencia de sistemas de climatización.

Edificaciones Nuevas:

- Verificar que los sistemas instalados operen conforme a los parámetros establecidos en el diseño.
- Realizar ajustes iniciales basados en los resultados de la VTE inicial.

- 2. Integración de tecnologías renovables.** Incorporar fuentes de energía renovable como paneles solares o almacenamiento de energía térmica o eléctrica es relevante para alcanzar el balance energético Neto Cero. Validar que estas tecnologías estén configuradas para cubrir las demandas residuales de energía permite cumplir con los principios de ECE.

Edificaciones Existentes:

- Evaluar la viabilidad técnica y económica de tecnologías como paneles solares, sistemas de almacenamiento energético y calentadores solares de agua.
- Adaptar las instalaciones existentes para maximizar la eficiencia de las fuentes de energía renovable.

Edificaciones Nuevas:

- Garantizar que las tecnologías renovables instaladas durante la construcción operen de manera óptima.
- Monitorear el desempeño de estas tecnologías para asegurar su alineación con las metas de diseño.

- 3. Implementación de controles avanzados.** Los sistemas de automatización y control avanzados son una herramienta para gestionar eficientemente el consumo energético y las condiciones de IEQ.

Edificaciones Existentes:

- Incorporar BMS para monitorear y gestionar el consumo energético en tiempo real.
- Configurar controles que ajusten automáticamente sistemas de climatización, iluminación y otros equipos según las necesidades de operación.

Edificaciones Nuevas:

- Verificar que los controles instalados estén configurados adecuadamente para maximizar su eficiencia.
- Realizar pruebas de operación para garantizar una respuesta eficiente a las condiciones internas y externas y a condiciones de carga total y parcial.

4. Evaluación del impacto de las medidas de mejora. Medir el impacto de las estrategias implementadas en consumo energético e IEQ es importante para verificar que se logren los objetivos de ECE.

Edificaciones Existentes:

- Usar bEQ “*In Operation*” para evaluar los ahorros energéticos en términos de kWh, la reducción de emisiones de CO_{2e} y las mejoras en IEQ.
- Comparar los resultados con las líneas base definidas en la fase 1.

Edificaciones Nuevas:

- Validar que las medidas implementadas cumplan con las metas de diseño utilizando bEQ “*In Operation*”.
- Identificar posibles desviaciones y proponer ajustes correctivos.

d) Gestión energética y ambiental

La fase 4 se enfoca en la gestión eficiente de la energía y los recursos ambientales para garantizar operaciones sostenibles en edificaciones nuevas y existentes. Esto incluye la optimización del consumo energético a través de estrategias de gestión activa de la demanda y la reducción del impacto ambiental mediante la implementación de prácticas sostenibles como la gestión eficiente de agua y residuos. La integración de estas acciones permite que las edificaciones operen de manera responsable, minimizando costos y maximizando la sostenibilidad a lo largo de su ciclo de vida sin comprometer las condiciones de IEQ.

1. Gestión activa de la demanda energética. Reducir la demanda energética mediante ajustes de operación como el control de horarios y la optimización de cargas contribuye directamente a minimizar el consumo energético, alcanzar el balance energético neto cero y mantener las condiciones de IEQ. Estas acciones también contribuyen a la reducción de emisiones de CO_{2e} beneficiando los objetivos de ENC.

Edificaciones Existentes:

- Ajustar horarios de operación de sistemas de climatización, iluminación y equipos eléctricos para reducir picos de consumo.
- Implementar estrategias de gestión de la demanda basadas en datos recopilados mediante sistemas de monitoreo continuo.

Edificaciones Nuevas:

- Configurar sistemas avanzados de gestión energética para garantizar que operen según las metas definidas en el diseño.
- Verificar que las configuraciones iniciales de los sistemas estén alineadas con los patrones de uso reales.

- 2. Optimización del Uso de Recursos.** Reducir y gestionar eficientemente el consumo de recursos como agua y materiales confirma el compromiso con la sostenibilidad en la operación de las edificaciones.

Edificaciones Existentes:

- Implementar estrategias de reducción del consumo de agua mediante la instalación de dispositivos de bajo flujo y la reutilización de agua donde sea posible.
- Gestionar residuos mediante programas de reciclaje y eliminación adecuada que minimicen el impacto ambiental.

Edificaciones Nuevas:

- Garantizar que las tecnologías instaladas para la gestión de recursos funcionen de manera eficiente.
- Incorporar prácticas sostenibles en las actividades de operación y mantenimiento para mantener las metas de ENC y ECE.

- 3. Implementación de estrategias ambientales.** Alinear las prácticas de operación con metas ambientales nacionales y globales refuerza el compromiso con la sostenibilidad.

Edificaciones Existentes:

- Evaluar el impacto ambiental de las operaciones actuales y desarrollar planes de mejora para minimizar emisiones de CO₂e y residuos.
- Integrar prácticas sostenibles en los procedimientos diarios de operación.

Edificaciones Nuevas:

- Validar que las estrategias ambientales implementadas en el diseño sean efectivas durante la operación.
- Monitorear indicadores ambientales para garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos en el OPR.

e) Mejora continua

La fase 5 garantiza que las edificaciones mantengan un alto desempeño a lo largo del tiempo mediante la implementación de mecanismos de monitoreo continuo, ajustes dinámicos y programas de recommissioning periódicos. Además, se incorpora la retroalimentación de los usuarios para adaptar las estrategias de operación y mantenimiento a sus necesidades y expectativas. Este proceso asegura que los sistemas operen de manera eficiente y sostenible mientras se integran lecciones aprendidas y se actualizan documentos relevantes para mantener alineados con las metas de ENC, ECE e IEQ.

1. Monitoreo continuo y ajustes periódicos. El monitoreo constante del desempeño de los sistemas permite que los sistemas se mantengan alineados con las metas de ECE a lo largo del tiempo al igual que identificar diferencias y realizar ajustes para mantener un alto desempeño e IEQ que benefician también la consecución de ENC. La AVTE lidera este proceso, coordinando la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real, analizando datos de la operación y validando que los ajustes realizados en los sistemas activos y pasivos contribuyan al balance energético neto y la IEQ.

Edificaciones Existentes:

- Implementar sistemas de monitoreo continuo como sensores y herramientas integradas en BMS para rastrear indicadores como consumo energético, emisiones de CO₂e e IEQ.

- Registrar datos de operación en tiempo real y analizarlos para detectar tendencias o anomalías que requieran ajustes inmediatos.
- Realizar ajustes periódicos en sistemas de climatización, iluminación y automatización según las necesidades identificadas.

Edificaciones Nuevas:

- Validar que los sistemas de monitoreo instalados durante el diseño y construcción estén operativos y alineados con las metas de diseño.
- Realizar ajustes iniciales y establecer rutinas de seguimiento para asegurar la estabilidad de la operación.

2. Retroalimentación del usuario

La retroalimentación de los ocupantes es fundamental para mejorar la operación de la edificación y garantizar su bienestar y satisfacción. La AVTE recopila la retroalimentación de los ocupantes para identificar oportunidades de mejora en las estrategias de operación y mantenimiento y de esta manera realizar los ajustes necesarios para que respondan tanto a las metas de sostenibilidad como a las necesidades de IEQ.

Edificaciones Existentes:

- Diseñar mecanismos para recolectar la retroalimentación de los usuarios sobre aspectos como confort térmico, calidad del aire interior (IAQ) y funcionalidad de los espacios.
- Incorporar los comentarios en los planes de operación y mantenimiento para realizar ajustes que mejoren la experiencia de los ocupantes.

Edificaciones Nuevas:

- Implementar encuestas y herramientas digitales que permitan capturar las opiniones de los usuarios durante el inicio de la operación.
- Asegurar que los comentarios se traduzcan en acciones concretas que permitan ajustar las configuraciones o estrategias de operación según sea necesario.

- 3. Revisión y actualización de documentos.** La AVTE supervisa la actualización de documentos como el Manual de O&M, las BoD y el OPR, asegurando que estén registrados los ajustes realizados durante el retrocommissioning y el recommissioning. Esta supervisión permite que la documentación técnica esté alineada con las condiciones actuales de operación y las metas de sostenibilidad de la edificación.

Edificaciones Existentes:

- Revisar y ajustar el “*Current Facility Requirements*” (CFR) y el Manual de O&M con base en las modificaciones realizadas a los sistemas y estrategias de operación.
- Documentar las acciones implementadas durante el retrocommissioning para facilitar futuras auditorías energéticas y ajustes.

Edificaciones Nuevas:

- Actualizar el OPR y el Manual de O&M según los hallazgos del recommissioning y las necesidades de los ocupantes.
- Incorporar nuevas estrategias de operación derivadas de los ajustes iniciales y las lecciones aprendidas.

- 4. Planeación para recommissioning periódico.** El recommissioning periódico garantiza que los sistemas mantengan su eficiencia y cumplan con las metas de operación a largo plazo.

Edificaciones Existentes:

- Establecer ciclos de recommissioning cada 3 - 5 años para recalibrar y optimizar los sistemas según las necesidades actuales de la edificación.
- Usar datos históricos recopilados durante el monitoreo continuo para identificar prioridades en el recommissioning.

Edificaciones Nuevas:

- Programar el recommissioning como parte de las actividades regulares de mantenimiento preventivo para asegurar que se estén cumpliendo con los objetivos y metas de diseño.

- Incluir revisiones de desempeño específicas para validar que los sistemas como los de climatización, iluminación y automatización continúen operando eficientemente.

2) *Impacto de la VTE o Commissioning en la operación de edificaciones sostenibles*

La Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning es un proceso integral que garantiza que las edificaciones operen conforme a los objetivos definidos en su diseño y construcción. Según ASHRAE, en sus documentos Guía 0, “*GreenGuide*” y el “*High-Performance Buildings Simplified*”, este proceso es esencial para alinear el funcionamiento de los sistemas activos y pasivos con los estándares de Edificaciones Neto Cero (ENC), Edificaciones Cero Energía (ECE) y Calidad Ambiental Interior (IEQ), lo que permite tener edificaciones con un desempeño eficiente y sostenible a lo largo de todo el ciclo de vida. También es relevante en el contexto de edificaciones de uso educativo que la VTE es una herramienta fundamental para enfocar acciones específicas a mejorar el confort térmico lo cual impacta significativamente en la productividad y desempeño académico de los estudiantes.

La VTE no solo se limita a las etapas iniciales del proyecto como ya se ha mostrado en las secciones A y B de este capítulo, sino que desempeña un papel importante y permanente en la operación de las edificaciones. Durante esta fase, conceptos como el retrocommissioning y el recommissioning permiten evaluar, recalibrar y ajustar los sistemas para mantener o mejorar su desempeño frente a los cambios en las condiciones de operación, la ocupación y los avances tecnológicos. Los objetivos principales de la VTE durante la operación de las edificaciones son:

1. Asegurar la continuidad entre diseño, construcción y operación lo que permite que las metas establecidas en las etapas iniciales se traduzcan en resultados reales y medibles durante la operación.
2. Optimizar el desempeño energético y ambiental para identificar y corregir ineficiencias en la operación que minimicen el consumo energético y reduzcan las emisiones de CO_{2e}.
3. Garantizar la sostenibilidad y adaptabilidad bajo un escenario de ajustes dinámicos y estrategias de mejora continua lo que permite que las edificaciones respondan eficazmente a cambios en sus condiciones y necesidades.

A continuación, se relaciona como la VTE contribuye a que cada lineamiento de operación y mantenimiento propuesto en esta sección sea implementado exitosamente en cada fase propuesta en la Fig. 48 para la operación eficiente de edificaciones.

Fase 1: Evaluación y diagnóstico inicial

- Facilita a través de la AVTE la validación y actualización de documentos relevantes como el OPR, BoD y Manual de O&M.
- Proporciona herramientas para establecer líneas base precisas mediante auditorías energéticas y bEQ coordinadas por la AVTE.
- Refuerza el diagnóstico técnico al integrar actividades de retrocommissioning para identificar ineficiencias.

Fase 2: Planificación de mantenimiento y capacitación

- Asegura que los planes de mantenimiento estén alineados con las condiciones actuales de los sistemas.
- Proporciona mediante la coordinación de la AVTE la capacitación técnica específica basada en los hallazgos de las fases previas que le permita al personal de O&M gestionar tanto tecnologías avanzadas como sistemas existentes.

Fase 3: Medidas de eficiencia energética y energías renovables

- Verifica a través de la AVTE la integración de tecnologías de energías renovables y asegura que operen conforme a los estándares establecidos.
- Optimiza o renueva sistemas existentes mediante retrocommissioning y ajusta configuraciones iniciales en sistemas nuevos bajo la coordinación y supervisión de la AVTE.
- Configura sistemas de automatización y control para garantizar la gestión eficiente de energía y la IEQ.

Fase 4: Gestión energética y ambiental

- Monitorea el impacto de estrategias de gestión de recursos y ajusta sistemas según las necesidades de operación.

- Valida a través de la AVTE que las prácticas sostenibles implementadas en diseño y construcción sean efectivas en la operación.

Fase 5: Mejora continua y retroalimentación de usuarios

- Coordina a través de la AVTE ciclos regulares de recommissioning para mantener la eficiencia energética y las condiciones de IEQ.
- Incorpora la retroalimentación de los usuarios para ajustar estrategias de operación y mantenimiento según las necesidades del momento.
- Garantiza bajo la coordinación de la AVTE la actualización de documentos relevantes para la operación de la edificación mostrando los cambios en las condiciones de funcionamiento y lecciones aprendidas.

Como se ha podido mostrar, la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning actúa como el eje estratégico que permite a las edificaciones de alto desempeño mantener su alineación con los objetivos de ENC, ECE e IEQ durante su operación.

3) Resumen de lineamientos de operación eficiente de edificaciones, relación con la VTE y resultados esperados

Los lineamientos y resultados consolidados que se presentan a continuación están organizados según las cinco fases definidas en esta sección. Cada fase detalla los objetivos específicos, las estrategias implementadas y las actividades clave de la VTE o Commissioning, siguiendo las directrices de ASHRAE en el estándar 202 y la Guía 0. La TABLA VII muestra un desglose por fase, mostrando como las actividades puntuales de la VTE o Commissioning y los logros que se obtienen contribuyen al cumplimiento de las metas de ENC, ECE e IEQ.

TABLA VII LINEAMIENTOS DE OPERACIÓN EFICIENTE BASADOS EN EDIFICACIONES CERO ENERGÍA (ECE) Y COMMISSIONING

Fase	Lineamiento	Descripción Breve	Actividades de Commissioning	Resultados Esperados
Fase 1	Validación de Documentos	Actualizar el OPR, BoD y Manual de O&M para alinearlos con ENC, ECE e IEQ.	- Revisar y validar el OPR y BoD - Desarrollar el CFR en edificaciones existentes.	Documentación alineada con metas de sostenibilidad.

Fase	Lineamiento	Descripción Breve	Actividades de Commissioning	Resultados Esperados
Fase 2	Definición de Líneas Base	Establecer referencias de consumo energético, emisiones e IEQ.	- Realizar auditorías energéticas - Usar bEQ “<i>In Operation</i>” para recopilar y validar datos iniciales.	Líneas base precisas y representativas definidas.
	Diagnóstico Técnico y Mejora	Identificar ineficiencias en sistemas clave y planificar mejoras.	- Integrar retrocommissioning para recalibrar sistemas existentes - Analizar resultados del bEQ.	Ineficiencias corregidas y plan de mejoras.
	Plan de Mantenimiento	Diseñar y validar planes preventivos y predictivos para sistemas clave.	- Evaluar planes con resultados del retrocommissioning - Asegurar compatibilidad con OPR y BoD.	Mantenimiento adaptado a necesidades actuales.
	Capacitación del Personal de O&M	Formar al personal en la gestión de sistemas avanzados y existentes.	- Establecer programas específicos de formación.	Equipo preparado para gestionar eficientemente sistemas pasivos y activos.
	Optimización de Sistemas Existentes	Mejorar el desempeño de los sistemas mediante ajustes y recalibraciones.	- Recalibrar equipos mediante retrocommissioning - Validar configuraciones iniciales de sistemas pasivos y activos.	Sistemas ajustados para operar a máxima eficiencia.
	Integración de Renovables	Incorporar tecnologías renovables para reducir impacto ambiental.	- Validar instalación de energías renovables y otras tecnologías - Monitorear desempeño inicial.	Tecnologías renovables operando eficientemente.
Fase 3	Implementación de Controles Avanzados	Configurar sistemas para monitoreo y gestión energética eficiente.	- Instalar y configurar BMS - Ajustar sistemas para condiciones operativas internas, externas y carga total y parcial.	Consumo energético controlado y condiciones de IEQ estables.
	Evaluación del Impacto de Mejora	Medir los efectos de las estrategias implementadas en consumo y IEQ.	- Usar bEQ “<i>In Operation</i>” para evaluar ahorros energéticos y mejoras en IEQ - Ajustar sistemas según resultados.	Impacto positivo validado con datos confiables.

Fase	Lineamiento	Descripción Breve	Actividades de Commissioning	Resultados Esperados
Fase 4	Gestión de la Demanda Energética	Reducir picos de consumo energético mediante ajustes operativos.	- Configurar horarios de operación y automatización - Monitorear datos para ajustes continuos.	Picos de demanda reducidos y consumo energético optimizado.
	Optimización del Uso de Recursos	Reducir el consumo de agua y materiales y gestionar residuos eficientemente.	- Monitorear consumo de recursos mediante sensores - Implementar estrategias de reducción de consumo energético.	Recursos gestionados sosteniblemente.
	Estrategias Ambientales	Implementar prácticas sostenibles alineadas con metas globales.	- Validar impacto ambiental de estrategias mediante auditorías - Ajustar sistemas según resultados.	Prácticas operativas sostenibles implementadas.
	Monitoreo Continuo y Ajustes	Establecer mecanismos de monitoreo y ajustes dinámicos.	- Instalar sensores y herramientas para recopilación de datos en tiempo real - Realizar ajustes periódicos.	Sistemas optimizados continuamente.
Fase 5	Retroalimentación del Usuario	Incorporar comentarios de los ocupantes para mejorar la operación e IEQ.	- Diseñar encuestas y recoger retroalimentación - Integrar ajustes según necesidades de usuarios.	Experiencia de usuarios mejorada.
	Actualización de Documentos	Mantener la documentación técnica actualizada según lecciones aprendidas.	- Revisar y ajustar OPR, BoD y Manual de O&M - Documentar cambios implementados.	Documentación técnica alineada con condiciones actuales.
	Recommissioning Periódico	Garantizar el desempeño continuo mediante ciclos regulares de revisión.	- Programar recommissioning cada 3-5 años - Validar alineación con metas de diseño y operación.	Desempeño sostenido y adaptabilidad garantizada.

H. Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle

La transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) requiere de una visión integral que combine estrategias de diseño, construcción y operación enfocadas en mejorar la eficiencia

energética y la Calidad Ambiental Interior (IEQ) con soluciones que integren sistemas pasivos, activos y energías renovables. Esta sección presenta una hoja de ruta basada en el caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) y en lo propuesto en las secciones A, B y C demostrando cómo tanto edificaciones existentes como nuevas pueden adoptar estas estrategias para lograr ENC.

La estructura de esta hoja de ruta se fundamenta en las directrices propuestas por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) para el desarrollo de hojas de ruta hacia la sostenibilidad energética. Según estas directrices, una hoja de ruta debe identificar metas claras, proponer estrategias específicas y establecer un marco de implementación que permita alcanzar los objetivos planteados. Esta metodología garantiza que la propuesta sea técnica, viable y alineada con los estándares internacionales así como poder responder a las particularidades de la edificación objeto de estudio en el contexto climático de Cali.

Esta propuesta responde a la necesidad institucional identificada en Univalle de contar con un documento estratégico y método que guíe la transformación de sus edificaciones hacia modelos sostenibles, eficientes y descarbonizados. Lo anterior, es coherente con las metas globales de sostenibilidad y con el compromiso que debe tener la universidad con la descarbonización de su campus que le permita marcar un camino claro hacia la reducción de emisiones de CO_{2e} y el uso responsable de la energía.

La hoja de ruta aprovecha el conocimiento y la experiencia adquirida a través de nuestra destacada participación en el programa del proyecto CEELA: Hoja de Ruta Universidades Cero Emisiones. Esta iniciativa fomenta la descarbonización de los campus universitarios para que se conviertan en sitios de cero emisiones y contribuyan a fomentar las edificaciones sostenibles en América Latina. La hoja de ruta se centra principalmente en las edificaciones existentes en Univalle, ofreciendo estrategias para optimizar su desempeño energético, reducir emisiones de CO_{2e} y alcanzar el estándar de ENC. Adicionalmente, incluye un apartado específico para abordar consideraciones aplicables a nuevas construcciones y renovaciones mayores con base en lo propuesto en las secciones de diseño (sección A) y construcción (sección B).

Además, esta hoja de ruta resalta la importancia de la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning como una herramienta integradora para monitorear, validar y mejorar continuamente el desempeño energético y la IEQ. Esta hoja de ruta no solo busca ser en una guía práctica para el caso de estudio, sino también un método replicable para otras edificaciones y que

de esta manera contribuya significativamente a la meta de descarbonización de los campus universitarios de Univalle y potencialmente extensible a otras instituciones.

1) Metodología para el desarrollo de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle

La metodología empleada para el desarrollo de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle tuvo como base los aprendizajes y herramientas proporcionadas en el marco del proyecto CEELA. Este proceso se estructuró en tres fases principales, denominadas por CEELA “talleres”, los cuales permitieron presentar los avances que se iban teniendo con base en los objetivos propuestos para cada fase y establecer las bases para construir una hoja de ruta adaptada al contexto de la Univalle.

a) Taller # 1: Contexto y alcance

Esta primera etapa se centró en sentar las bases del proyecto definiendo el alcance y los objetivos de la hoja de ruta para Univalle con base en las siguientes actividades:

- **Análisis del contexto institucional:** Se revisaron los planes y normativas institucionales como el Plan de Desarrollo 2015-2025 de Univalle, y las políticas locales como el Manual de Construcción Sostenible de Cali 2022.
- **Identificación de actores clave:** Se convocó a un grupo multidisciplinario incluyendo expertos de CEELA, representantes de la Facultad de Ingeniería y profesionales en diseño bioclimático de la Escuela de Arquitectura de Univalle para establecer las líneas generales del proyecto.
- **Inventario de acciones previas:** Se documentaron iniciativas relevantes relacionadas con sostenibilidad y eficiencia energética dentro del campus y a nivel nacional.
- **Definición de objetivos:** Se establecieron metas específicas alineadas con los principios de Edificaciones Neto Cero (ENC) y Edificaciones Cero Energía (ECE) donde se priorizaban la mejora del consumo energético (reducción del EUI), la reducción de emisiones de CO_{2e} y la mejora de la Calidad Ambiental Interior (IEQ).

b) Taller # 2: Levantamiento de datos y construcción de la línea base

En esta fase se recopiló la información necesaria para establecer las condiciones iniciales de la edificación piloto que en este caso correspondió a la Escuela de Enfermería de Univalle

(EEU). Inicialmente, se habían seleccionado tres edificaciones pertenecientes a la Escuela de Ingeniería Mecánica como posibles casos de estudio. Sin embargo, debido a dificultades prácticas relacionadas con la obtención de datos específicos de consumo energético (ya que estas edificaciones no contaban con contadores independientes ni facturación separada) se decidió optar por la Escuela de Enfermería como alternativa más viable. Las principales actividades en esta fase fueron:

- **Auditoría energética de nivel I:** Se aplicó el proceso propuesto en ASHRAE bEQ para evaluar el consumo energético y posteriormente calcular las emisiones de CO_{2e} de la EEU. Esta auditoría permitió identificar ineficiencias en sistemas de climatización, iluminación y envolvente.
- **Levantamiento de información técnica:** Se analizaron datos sobre potencias térmicas y eléctricas de placas de equipamiento existente y patrones de consumo.
- **Cálculos para definir línea base:** Se utilizaron los formatos de Excel propuestos por ASHRAE para registrar datos de facturas de servicios públicos, datos levantados en campo y patrones de consumo para calcular el EUI (kWh/m²-año) y las emisiones en términos de tCO_{2e} de la edificación. También se realizaron simulaciones en DesignBuilder para calcular la carga térmica de la edificación y el estado actual de iluminación de los espacios.
- **Identificación de oportunidades de mejora:** Los resultados del diagnóstico permitieron priorizar las intervenciones necesarias para optimizar el desempeño energético y de IEQ de la EEU.

c) Taller # 3: Validación y propuesta de estrategias

En el Taller #3 se revisaron y validaron las estrategias propuestas para la hoja de ruta centrando la discusión en tres alternativas principales para orientar las intervenciones en la EEU:

- **Alternativa #1: Diversificar la fuente y mantener las necesidades invariables.** Esta alternativa buscaba diversificar las fuentes de energía utilizadas por la EEU, integrando opciones renovables como la energía solar. El objetivo era reducir el impacto ambiental del consumo energético sin modificar las necesidades actuales de la edificación manteniendo la operación y el desempeño actual sin ajustes significativos.

- **Alternativa #2: Reducir la necesidad pero manteniendo condiciones óptimas de IEQ.** Enfocada en reducir la demanda energética de la EEU, esta alternativa incluía medidas como la optimización de sistemas de climatización, iluminación y equipos de cómputo. Además, garantizaba que las condiciones de confort térmico, calidad del aire interior e iluminación natural (IEQ) no se vieran comprometidas durante el proceso de mejora.
- **Alternativa #3: Diversificar la fuente y reducir la necesidad.** Esta opción combinó los enfoques de las dos alternativas anteriores proponiendo una estrategia integral que incluía tanto la diversificación de fuentes de energía como la reducción de la demanda energética. La implementación de esta alternativa se estructuró en cinco etapas principales:
 - Auditorías energéticas: Cálculo de indicadores como kWh/m²-año y tCO_{2e}-año mediante el uso de bEQ de ASHRAE.
 - Diseño pasivo: Evaluación de estrategias arquitectónicas y tecnológicas para optimizar el desempeño energético e IEQ.
 - Simulación de escenarios: Modelado de escenarios para evaluar la viabilidad de Edificaciones Cero Energía (ECE) y Edificaciones Neto Cero (ENC).
 - Validación de metas: Evaluación del cumplimiento de objetivos de emisiones de CO_{2e}, eficiencia energética e IEQ.
 - Elaboración de la hoja de ruta: Desarrollo de un plan claro y detallado para implementar las medidas propuestas.
- **Presentación de resultados:** Los hallazgos del diagnóstico, cálculos y las simulaciones fueron compartidos con un grupo multidisciplinario de expertos en diferentes disciplinas técnicas. En este espacio los participantes discutieron la viabilidad de las estrategias propuestas incluyendo técnicas de diseño pasivo y opciones de mejora en sistemas activos.
- **Revisión crítica:** Se evaluaron los beneficios de las intervenciones recomendadas considerando la aplicabilidad de cada estrategia al contexto del campus.

El taller #3 permitió evaluar estas alternativas considerando factores técnicos, económicos y prácticos que sirvieron como base para definir las estrategias de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle.

2) Metas

Las metas de esta hoja de ruta se derivan directamente de los resultados obtenidos en el caso de estudio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU). Este análisis incluyó auditorías energéticas de nivel I, simulaciones en DesignBuilder y el diseño de estrategias pasivas y renovables que demostraron su efectividad en la mejora del consumo energético (EUI), la reducción de emisiones de CO_{2e} y la mejora de la Calidad Ambiental Interior (IEQ).

a) Reducir la Intensidad de Uso de Energía (EUI)

Reducir el EUI (kWh/m²-año) de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) en un 30% para el año 2030 y 70% para el 2040 tomando como base los indicadores de consumo energético iniciales establecidos en 2024.

La reducción del EUI es fundamental para la transición hacia edificaciones energéticamente eficientes y ENC. Este objetivo se alinea con los principios de diseño pasivo, el uso racional de la energía y la integración de sistemas activos eficientes como herramientas clave para optimizar el consumo energético y reducir las emisiones de CO_{2e}. Además, está alineado con los objetivos nacionales de sostenibilidad definidos en la Hoja de Ruta Nacional. Dentro de las estrategias para lograr la reducción del EUI se proponen:

1. Optimización de la envolvente de la edificación.

- Incorporar aislamiento térmico en techos, muros y ventanas teniendo en cuenta el contexto climático de Cali.
- Implementar vidrios de baja emisividad o control solar.
- Integrar techos verdes y materiales reflectantes para minimizar el efecto de isla de calor y mejorar el confort térmico al interior.

2. Control solar y ventilación natural.

- Diseñar elementos arquitectónicos como aleros y cortasoles que reduzcan las ganancias solares en las fachadas más expuestas.
- Promover la ventilación cruzada en los espacios principales de la edificación como parte de las estrategias de disipación de calor.
- Proyectar tragaluces periféricos para iluminación y con dilataciones para salida de aire caliente en ventilación natural.

3. Mejoras en sistemas activos y simulación energética.

- Reemplazar sistemas de climatización ineficientes por equipos de alta eficiencia energética.
- Implementar un sistema de gestión energética que permita el monitoreo y control en tiempo real de los consumos.
- Realizar simulaciones energéticas periódicas para evaluar el impacto de las intervenciones realizadas.

4. VTE o Commissioning.

- Incluir la VTE como un proceso continuo en las etapas de diseño, construcción y operación para asegurar que las estrategias cumplan con los objetivos planteados.

5. Gestión del comportamiento de los usuarios.

- Sensibilizar personal administrativo de alto rango para incorporarlos dentro del proceso de concientización y entendimiento de la importancia de las estrategias de sostenibilidad prácticas y la reducción del acondicionamiento de aire en espacios pedagógicos.
- Sensibilizar al personal administrativo, estudiantes y usuarios de la EEU sobre el uso eficiente de la energía.
- Implementar campañas educativas que promuevan el ahorro energético y la adopción de hábitos sostenibles.

Los indicadores de seguimiento propuestos a esta meta son:

1. Reducción del EUI.

- Línea base inicial: 39.4 kWh/m²-año (2024, según auditoría energética inicial).
- Meta intermedia: 27.6 kWh/m²-año (reducción del 30% para 2030).
- Meta final: 70% menos de EUI para 2040.

2. Integración de energías renovable.

- Cubrir al menos un 30% de la demanda energética de la EEU con energías renovables para 2035 tal como se proyecten los cálculos con paneles fotovoltaicos.

3. Validación de resultados.

- Realizar auditorías energéticas periódicas según bEQ “*In Operation*” que demuestren el cumplimiento de los objetivos de reducción de consumo energético definidos.

b) Mejora de la Calidad Ambiental Interior (IEQ)

Garantizar que el 100% de los espacios de la EEU cumplan con estándares internacionales de confort térmico, Calidad del Aire Interior (IAQ) e iluminación natural para el año 2027 utilizando estrategias de diseño pasivo y tecnologías eficientes.

La IEQ es un componente fundamental para la salud, el bienestar y la productividad de los ocupantes. En el contexto universitario, mejorar el IEQ es importante para crear un ambiente propicio para el aprendizaje y el trabajo. Esta meta se alinea con los principios de diseño pasivo, estándares internacionales como ASHRAE 55 y 62.1, y las estrategias de mejora de la IEQ propuestas. Dentro de las estrategias para mejorar la IEQ se proponen:

1. Confort térmico.

- Incorporar materiales aislantes, de baja emisividad y barreras radiantes en techos y paredes para reducir la transferencia de calor.
- Diseñar ventanas y aberturas que promuevan la ventilación cruzada y disipen el calor acumulado.
- Implementar cortasoles, aleros y elementos de sombreado en fachadas para minimizar las ganancias solares directas.
- Incorporar cubiertas vegetales y reflectivas que ayuden a reducir la temperatura en los espacios interiores.
- Incorporar técnicas de minimización de radiación térmica (emisividad) desde superficies, cielos, y muros interiores.

2. Calidad del Aire Interior (IAQ).

- Implementar sistemas de ventilación híbrida o enfriamiento radiante que combinen estrategias naturales y mecánicas para mantener niveles de CO₂ por debajo de 800 ppm.
- Garantizar que los acabados y materiales seleccionados sean bajos en emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) para que no comprometan la calidad del aire.
- Instalar sensores de CO₂, humedad relativa y temperatura en los espacios para asegurar condiciones óptimas de IAQ.

3. Iluminación natural.

- Diseñar tragaluces, claraboyas y ventanas estratégicamente para maximizar la entrada de luz natural sin comprometer el confort térmico y de esta manera optimizar el Factor de Luz Día (DF).
- Usar colores claros en paredes y techos para distribuir de manera uniforme la luz natural en los espacios interiores.
- Incorporar elementos como persianas ajustables y vidrios con control de ganancia solar para evitar deslumbramientos al interior de los espacios.

Los indicadores de seguimiento propuestos a esta meta son:

1. Confort térmico.

- Temperaturas interiores dentro del rango recomendado por ASHRAE 55 (aproximadamente 24°C - 26°C).
- Humedad relativa entre el 40% y el 60%.
- Control de la carga térmica por radiación mediante el uso de películas de bajísima emisividad superficial en muros y techos.

2. Calidad del Aire Interior (IAQ).

- Concentración de CO₂ por debajo de 800 ppm en espacios ocupados.
- Uso de materiales con certificaciones de bajas emisiones de COV.

3. Iluminación natural.

- Factor de Luz Día (DF) $\geq 2\%$ en áreas de trabajo.
- Niveles de iluminación superiores a 300 lux durante horas de ocupación.

c) Reducción de Emisiones de Carbono Operacional

Reducir la cantidad de tCO_{2e} producto de la operación de la EEU en un 30% para 2030, respecto a la línea base de 2024, con el objetivo de avanzar hacia un 70% de reducción en 2040 y llegar a la neutralidad de carbono operacional para el año 2050 mediante una combinación de diseño pasivo, eficiencia energética, energías renovables, y estrategias de operación y mantenimiento para edificaciones de alto desempeño.

La reducción de las emisiones de carbono operacional es un objetivo básico para la transición hacia ENC. Este objetivo aborda no solo los sistemas de climatización, sino también el

uso general de energía, la integración de energías renovables y la optimización de la operación y el mantenimiento de la edificación. Además, está alineado con los compromisos de la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono y las recomendaciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA). La reducción del uso de energía es concomitante con la reducción de emisiones de CO₂e. Dentro de las estrategias para reducir las emisiones de carbono operacional están:

1. Optimización energética.

- Diseñar estrategias de operación eficiente orientadas a reducir el consumo de energía en iluminación, equipos eléctricos y sistemas de climatización.
- Implementar sistemas de gestión energética que monitoreen el uso de energía en tiempo real y que permitan identificar y corregir ineficiencias.
- Priorizar la reducción de la demanda energética mediante estrategias de diseño pasivo (control solar, ventilación natural, techos verdes, entre otros.).

2. Sustitución y modernización de sistemas activos.

- Reemplazar equipos antiguos por tecnologías de alta eficiencia que utilicen refrigerantes de bajo GWP.
- Sustituir luminarias ineficientes por LED con sistemas de control adaptativos para reducir el consumo.

3. Integración de energías renovables.

- Instalación de paneles solares fotovoltaicos en áreas disponibles de la EEU.
- Incorporación de tecnologías de almacenamiento energético (eléctrico y/o térmico) para maximizar el uso de energía renovable en horarios de alta demanda.

4. Gestión de refrigerantes y residuos.

- Recuperar y disponer adecuadamente los refrigerantes de equipos obsoletos para evitar fugas de gases con alto impacto sobre el medio ambiente.
- Establecer protocolos de mantenimiento preventivo para minimizar pérdidas en los nuevos sistemas.

5. Compensación de emisiones residuales.

- Participar en proyectos de reforestación en el campus o en iniciativas regionales para capturar carbono.
- Incluir créditos de carbono como una herramienta complementaria para alcanzar ENC.

Los indicadores de seguimiento propuestos a esta meta son:

1. Reducción de emisiones de carbono operacional.

- Línea base inicial: 13.1 tCO₂e-año en 2024.
- Meta intermedia: 9.2 tCO₂e-año (reducción del 30% para 2030).
- Meta final: Reducción del 70% para 2040.

2. Energías renovables.

- Cobertura del 30% de la demanda energética total mediante fuentes renovables para 2030.
- Incremento progresivo hasta el 50% para 2040.

3. Sistemas activos.

- 100% de equipos obsoletos reemplazados para 2030.
- Uso exclusivo de refrigerantes de bajo GWP en sistemas nuevos.

4. Eficiencia en la operación.

- Reducción en el consumo total de energía (kWh/m²-año) en comparación con la línea base de 2024, lo que a nuestro juicio resulta la técnica más efectiva.

d) Reducción de Emisiones de Carbono Embebido

Reducir el carbono embebido en los materiales y procesos constructivos de la EEU en un 20% para 2030 y un 40% para 2040 tomando como referencia las líneas base definidas en 2024. El carbono embebido incluye las emisiones asociadas a la extracción, fabricación, transporte, instalación, mantenimiento y disposición final de los materiales de construcción. Este es un componente crítico en la transición hacia ENC y representa una oportunidad significativa para reducir el impacto ambiental durante el ciclo de vida de la edificación. Esta meta está alineada con los compromisos establecidos en la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono y el análisis de ciclo de vida de las edificaciones (ACV). Dentro de las estrategias para reducir las emisiones de carbono embebido están:

1. Selección de materiales de bajo impacto.

- Priorizar el uso de materiales certificados que acrediten un bajo impacto de carbono.
- Incorporar materiales reciclados o reutilizados.

- Promover la investigación y uso de materiales alternativos locales como ladrillos de bajo carbono.
- Privilegiar el uso de materiales de producción local sobre los foráneos.

2. Diseño para la optimización de recursos.

- Implementar estrategias de diseño que minimicen el uso de materiales intensivos en carbono.
- Utilizar herramientas de modelado, como el “*Building Information Modeling*” (BIM) para optimizar el diseño y reducir desperdicios.
- Incluir elementos prefabricados y modulares en las renovaciones para disminuir los residuos y optimizar los recursos.

3. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

- Realizar estudios de ACV en etapas tempranas de diseño para identificar las mejores alternativas de materiales y sistemas constructivos.
- Establecer comparaciones entre diferentes proveedores y opciones de transporte para seleccionar la opción de menor impacto ambiental.

4. Gestión de residuos de construcción y demolición.

- Implementar programas de separación en sitio para maximizar la recuperación y reciclaje de residuos de construcción.
- Reutilizar materiales viables (como ladrillos o madera) en renovaciones y adecuaciones.

5. Educación y sensibilización.

- Capacitar a los equipos de diseño, construcción y mantenimiento sobre el impacto del carbono embebido y las mejores prácticas para su reducción.
- Promover campañas de sensibilización en el campus para que estudiantes y docentes comprendan la importancia de los materiales sostenibles.
- Promover campañas de sensibilización en administradores de alto rango para que comprendan y obliguen el uso de las estrategias y materiales sostenibles en el campus.

Los indicadores de seguimiento propuestos a esta meta son:

1. Reducción de Emisiones de Carbono Embebido.

- Línea base inicial: “X” número de tCO₂e-año en 2024.

- Meta intermedia: Reducción del 10% para 2027.
- Meta final: Reducción del 20% para 2030 y 40% para 2040.

2. Uso de materiales de bajo impacto.

- Usar al menos el 30% de materiales utilizados en proyectos de renovación y construcción deben contar con certificación o declaración ambiental de producto.
- Incrementar el uso de materiales reciclados o reutilizados hasta representar al menos el 20% del total de materiales empleados en renovaciones mayores o nuevas construcciones para 2030.

3. Gestión de residuos.

- Al menos el 70% de residuos de construcción y demolición deben ser reutilizados o reciclados para 2030.

e) Escalabilidad y replicabilidad

Diseñar una metodología replicable basada en el caso de estudio de la EEU con el objetivo de implementar ENC en al menos el 50% de las edificaciones de Univalle para el año 2040 y que permita que el proceso sea adaptable a diferentes contextos en sus diferentes sedes.

La transformación de los campus y sedes de Univalle hacia un modelo de sostenibilidad requiere que las lecciones aprendidas en el caso de estudio se plasmen en una metodología clara y práctica. Esto permitirá replicar las estrategias exitosas en otras edificaciones de Univalle lo que le permitirá consolidarse como referente en la adopción de prácticas eficientes para lograr ENC. Además, la escalabilidad garantiza que los esfuerzos tengan un impacto significativo a nivel institucional y regional. Por supuesto, también requieren el compromiso verás y efectivo de la administración en las altas esferas jerárquicas y de toma de decisiones. Dentro de las estrategias para lograr una escalabilidad y replicabilidad de esta hoja de ruta están:

1. Documentación del proceso.

- Desarrollar manuales técnicos y video que detallen las estrategias implementadas en el caso de estudio, incluyendo diseño pasivo, modernización de sistemas activos y estrategias de operación eficiente.
- Generar guías prácticas adaptativas que incluyan parámetros específicos para diferentes tipologías de edificaciones y condiciones climáticas del campus.

2. Realizar pilotos adicionales.

- Seleccionar edificaciones representativas dentro del campus para implementar las estrategias validadas en el caso de estudio.
- Priorizar edificaciones de alta ocupación o consumo energético para maximizar el impacto de las intervenciones.

3. Capacitación y transferencia de conocimientos.

- Diseñar programas de formación dirigidos a personal técnico, estudiantes y administradores del campus sobre estrategias de diseño, operación y mantenimiento de ENC.
- Promover la creación de un espacio académico interdisciplinario en Univalle para investigar, desarrollar y validar tecnologías y metodologías aplicables a ENC.

4. Monitoreo y evaluación continua.

- Implementar un sistema centralizado de monitoreo para comparar el desempeño energético y ambiental de las edificaciones intervenidas.
- Establecer indicadores clave de desempeño que permitan ajustar y mejorar la metodología en tiempo real.

5. Colaboraciones con entidades locales e internacionales.

- Participar en redes nacionales e internacionales de sostenibilidad como CEELA, el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), ASHRAE Colombia y ACAIRE²⁵ para compartir aprendizajes y necesidades de mejora.
- Establecer alianzas con entidades gubernamentales y privadas para cofinanciar y acelerar la implementación.

Los indicadores de seguimiento propuestos a esta meta son:

1. Número de edificaciones intervenidas.

- Meta intermedia: Implementar ENC en el 20% de las edificaciones del campus para 2030.
- Meta final: Alcanzar el 50% de las edificaciones con ENC para 2040.

2. Material técnico desarrollado.

- Manual técnico de implementación del caso de estudio para 2027.

²⁵ Asociación Colombiana del Acondicionamiento del Aire y la Refrigeración

- Guías prácticas adaptativas para replicación en otras edificaciones del campus para 2030.

3. Capacitación y sensibilización.

- Número de personas capacitadas en estrategias ENC.
- Creación de un programa académico interdisciplinario sobre ciencia de las edificaciones, descarbonización y sostenibilidad para 2035.

4. Impacto en la reducción de EUI y CO_{2e}.

- Desempeño energético y ambiental mejorado en las edificaciones intervenidas con base en auditorías realizadas en marco del programa bEQ de ASHRAE.

3) Hitos

Los hitos representan los logros clave en la implementación de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle. Cada hito se vincula con una meta específica que estable un cronograma claro para medir los avances en eficiencia energética, reducción de emisiones de CO_{2e} y Calidad Ambiental Interior (IEQ). A continuación, se relacionan los principales hitos para la implementación de esta hoja de ruta.

a) Diagnóstico energético y de Calidad Ambiental Interior (IEQ) – 2025

Realizar auditorías energéticas y de Calidad Ambiental Interior (IEQ) completas para establecer líneas base de EUI, CO_{2e} e IEQ de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) las cuales son fundamentales para la planificación de estrategias específicas de intervención. Este hito permitirá identificar equipos ineficientes, materiales con alto carbono embebido y puntos críticos de mejora en la operación, mediante la realización de auditorías de ASHRAE bEQ “*In Operation*” y simulaciones energéticas.

b) Implementación inicial de estrategias pasivas y activas – 2027

Implementar las primeras estrategias de diseño pasivo y modernización de sistemas activos en la EEU buscando obtener mejoras en eficiencia energética e IEQ. Este hito incluye la instalación de techos verdes, vidrios de control solar, sistemas de ventilación natural y la sustitución de equipos de climatización ineficientes por tecnologías modernas con refrigerantes de bajo GWP. Con estas acciones se espera alcanzar una reducción del 15% en el EUI respecto a la línea base, así como mejoras en la Calidad del Aire Interior (IAQ) y confort térmico.

c) Validación Técnica de la Edificación (VTE) y evaluación intermedia – 2030

Llevar a cabo el proceso de recommissioning en la EEU para verificar el desempeño energético y de IEQ después de las primeras intervenciones y de esta manera garantizar el cumplimiento de los objetivos establecidos. Este hito incluye auditorías post-intervención y simulaciones comparativas para validar una reducción del 25% en el EUI y un 15% en las emisiones de CO_{2e} operacional, además de confirmar el cumplimiento de estándares como ASHRAE 55 y 62.1.

d) Escalamiento inicial hacia un modelo de Edificaciones Neto Cero (ENC) – 2035

Aplicar las estrategias validadas en el caso de estudio para al menos dos edificaciones adicionales dentro del campus de Univalle dándole prioridad a aquellas con mayor consumo energético o relevancia dentro de la institución. Este hito busca intervenir en el 20% de las edificaciones del campus generando manuales técnicos y guías que fortalezcan la replicabilidad del modelo ENC, y que así se tengan mejoras significativas en el desempeño energético y de IEQ de las edificaciones intervenidas.

e) Consolidación del modelo de Edificaciones Neto Cero (ENC) en el 50% del campus – 2040

Lograr la implementación de estrategias ENC en al menos el 50% de las edificaciones del campus de Univalle que lleve a consolidar la transición hacia edificaciones más sostenibles. Este hito incluye la neutralidad de carbono operacional en la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), la reducción del 50% del EUI en las edificaciones intervenidas, y la integración de energías renovables que cubran entre el 30% y el 50% de la demanda energética del campus universitario.

4) Barreras y oportunidades

La implementación de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle implica reconocer tanto los desafíos como las oportunidades que ofrece el contexto institucional, social y climático de la universidad. Identificar estas barreras y oportunidades es vital para desarrollar estrategias que maximicen los beneficios de este proyecto, superen obstáculos y fortalezcan la capacidad de la institución para adoptar un modelo de edificaciones más sostenible.

En este contexto, las barreras representan los aspectos que requieren mayor atención y trabajo colaborativo mientras que las oportunidades reflejan el potencial de Univalle para posicionarse como líder en sostenibilidad para campus universitarios y servir como ejemplo para otras instituciones públicas.

a) Barreras

1. Ausencia de políticas institucionales para edificaciones sostenibles.

La falta de un marco formal que regule, promueva y obligue el uso de las estrategias de sostenibilidad en edificaciones limita la priorización de este tipo de proyectos en Univalle. Sin embargo, esta situación ofrece una oportunidad para construir un marco institucional que facilite la planificación y ejecución de intervenciones sostenibles que permitan que los objetivos institucionales estén alineados con prácticas más responsables y eficientes, y que obligue al compromiso de toda la comunidad universitaria, pero especialmente a las esferas más altas jerárquicamente en la toma de decisiones.

2. Procesos administrativos complejos.

Los procedimientos administrativos en instituciones públicas pueden ralentizar la ejecución de proyectos de gran escala, especialmente aquellos que requieren múltiples niveles de aprobación. Esto resalta la importancia de coordinar con las áreas responsables para simplificar procesos y garantizar una alineación clara con los objetivos estratégicos de la universidad.

3. Limitaciones en la disponibilidad de recursos financieros.

Los presupuestos restringidos de las universidades públicas pueden dificultar la financiación inicial de proyectos de ENC. No obstante, esta barrera puede transformarse en una oportunidad mediante el acceso a programas de financiamiento verde, cooperación internacional y alianzas estratégicas que aporten recursos adicionales para la implementación de soluciones sostenibles.

4. Necesidad de fortalecer las capacidades técnicas institucionales.

Es crucial desarrollar competencias especializadas en el personal técnico y administrativo de Univalle para gestionar las estrategias de ENC de manera eficiente y sostenible. Este aspecto puede abordarse mediante programas de capacitación, transferencia de conocimiento y colaboración con expertos externos permitiendo que el equipo interno tenga las herramientas necesarias para alcanzar los objetivos propuestos.

5. Desafíos de sensibilización y cultura organizacional.

La adopción de nuevas prácticas sostenibles requiere un cambio cultural tanto en los usuarios como en los tomadores de decisiones dentro de la universidad, sobre todo en altas jerarquías. Promover la sostenibilidad como un eje central del desarrollo institucional a través de campañas educativas y espacios de participación puede ayudar a superar este desafío y consolidar una cultura de sostenibilidad en toda la comunidad universitaria.

b) Oportunidades

1. Desarrollo de políticas institucionales de sostenibilidad.

El desarrollo de esta hoja de ruta deberá servir como un catalizador para que Univalle establezca políticas institucionales que promuevan la sostenibilidad en sus edificaciones lo que le permitirá mantener su compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Además, la hoja de ruta puede servir como modelo para integrar estrategias sostenibles a nivel institucional y de esta manera fortalecer la visión de la universidad como un referente en sostenibilidad.

2. Acceso a redes y programas de apoyo.

La participación de Univalle en redes como CEELA, el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), ASHARE Colombia, ACAIRE y programas internacionales proporciona acceso a recursos técnicos, financieros y de conocimiento que pueden facilitar la implementación de ENC. Estas alianzas fortalecen las capacidades internas y conectan a la universidad con iniciativas globales de sostenibilidad que fomentan el intercambio de experiencias y buenas prácticas.

3. Capacitación y participación activa de la comunidad universitaria.

La comunidad académica y estudiantil de Univalle es un aliado clave en el desarrollo, implementación y monitoreo de estrategias ENC. Integrar estas estrategias en proyectos de investigación y actividades curriculares no solo fomenta una cultura de sostenibilidad, sino que también fortalece el sentido de pertenencia y compromiso de la comunidad universitaria hacia el logro de estos objetivos.

4. Contexto climático de Cali.

Las condiciones climáticas de Cali ofrecen una oportunidad única para aprovechar estrategias pasivas como la ventilación natural, el control solar, y los techos verdes, y el enfriamiento evaporativo y radiante. Estas soluciones no solo mejoran la eficiencia energética de las

edificaciones, sino que también reducen la dependencia de sistemas mecánicos de climatización o facilitan la implementación de sistemas innovadores y disruptivos, lo que va en concordancia con los principios de diseño bioclimático.

5. Disponibilidad de recursos financieros para sostenibilidad.

El creciente interés global por las Edificaciones Neto Cero (ENC) ha incrementado la disponibilidad de fondos verdes, créditos de carbono y programas de cooperación internacional. Posicionar a Univalle como líder en sostenibilidad puede facilitar el acceso a estos recursos permitiendo financiar iniciativas innovadoras y escalables en el campus como la propuesta en esta tesis.

6. Potencial para convertirse en referente nacional.

Implementar esta hoja de ruta posicionará a Univalle como un modelo de sostenibilidad en el sector educativo colombiano que podrá inspirar a otras instituciones públicas y privadas a seguir un camino similar. Este reconocimiento no solo hará que la reputación de la universidad crezca sino que también consolide su liderazgo en la promoción de edificaciones sostenibles a nivel nacional y regional.

5) Acciones para ejecutar

A continuación, se detallan las acciones necesarias para implementar la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle con base en el caso de estudio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU). Estas acciones están alineadas con las metas, hitos y oportunidades previamente definidas y se dividen en cinco categorías principales para tratar las áreas clave de intervención.

a) Diagnóstico y establecimiento de líneas base

El primer paso es realizar un diagnóstico detallado de la Escuela de Enfermería para establecer las líneas base de consumo energético (EUI), emisiones de CO₂e y Calidad Ambiental Interior (IEQ). Este proceso incluirá:

- Auditorías energéticas bajo el marco de bEQ “*In Operation*” de ASHRAE para evaluar el desempeño actual.
- Simulaciones avanzadas con herramientas como DesignBuilder para identificar áreas críticas de intervención como sistemas ineficientes o materiales con alto carbono embebido.

- Priorización de estrategias a través de un plan de acción que considere impactos técnicos, económicos y ambientales.

b) Intervenciones en la edificación

Las intervenciones deben enfocarse en optimizar el desempeño energético e IEQ de la edificación mediante estrategias específicas como:

- Optimización de la envolvente incorporando aislamiento térmico en techos y muros, instalando vidrios de control solar y techos verdes, barreras radiantes, y aplicando acabados reflectantes y de baja emisividad.
- Modernización de sistemas activos sustituyendo equipos de climatización e iluminación por tecnologías de alta eficiencia y bajo impacto ambiental dándole prioridad al uso de refrigerantes de bajo GWP.
- Integración de energías renovables instalando paneles solares y evaluando tecnologías de almacenamiento energético para cubrir al menos el 30% de la demanda.

c) Gestión del cambio y sensibilización

El éxito del proyecto depende también de la participación activa de la comunidad universitaria. Para ello, se diseñarán:

- Programas de capacitación para personal técnico y administrativo enfocados en la operación eficiente de los nuevos sistemas.
- Campañas de sensibilización dirigidas a estudiantes y docentes para fomentar el uso racional de recursos energéticos y la adopción de hábitos sostenibles.

d) Validación técnica y monitoreo

Para asegurar el cumplimiento de los objetivos, se establecerá un sistema de Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning. Este sistema incluirá:

- Auditorías post-intervención para verificar los resultados de las estrategias implementadas.

- Ciclos periódicos de monitoreo y recommissioning que permitan ajustar las intervenciones y garantizar el desempeño continuo.

e) Replicabilidad y escalabilidad

El caso de estudio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) servirá como modelo para escalar las estrategias a otras edificaciones del campus. Esto incluye:

- Documentación del proceso en manuales técnicos y guías prácticas que faciliten la replicación.
- Realización de pilotos en al menos dos edificaciones adicionales antes de 2035 para validar el modelo.
- Participación activa de Univalle en redes nacionales e internacionales, como CEELA, CCCS, ASHRAE Colombia y ACAIRE para compartir aprendizajes y generar nuevas oportunidades de cooperación técnica y financiera.

6) Prioridades y plazos

La implementación de esta hoja de ruta sigue un cronograma que prioriza acciones inmediatas, intermedias y de largo plazo para garantizar el avance continuo hacia las metas establecidas. Las etapas están diseñadas para construir progresivamente sobre los logros alcanzados desde el diagnóstico inicial hasta la consolidación del modelo ENC en todo el campus.

a) Acciones a corto plazo (2025)

En esta etapa el objetivo estará centrado en establecer las líneas base y ejecutar las primeras estrategias en la edificación piloto lo que servirá para sentar las bases para futuras intervenciones. Las acciones incluyen:

- **Realizar auditorías energéticas e IEQ.** Implementar un diagnóstico completo para evaluar el consumo energético (EUI), las emisiones de CO_{2e} y las condiciones de Calidad Ambiental Interior (IEQ) de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU).
- **Ejecución de estrategias pasivas iniciales.** Aplicar medidas pasivas como la instalación de techos verdes, el control solar en fachadas y la optimización de la envolvente.

- **Definición de un plan maestro.** Establecer un cronograma detallado de las acciones futuras donde se prioricen aquellas que maximicen el impacto en la reducción del EUI y las emisiones de CO_{2e}.

b) Acciones a mediano plazo (2030)

Durante esta etapa se busca validar el impacto de las estrategias implementadas y extender el modelo ENC a otras edificaciones prioritarias del campus. Las actividades clave son:

- **Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning.** Llevar a cabo el proceso de recommissioning en el edificio piloto para confirmar la reducción del 25% en el EUI y un 15% en las emisiones de CO_{2e} operacional.
- **Documentación de aprendizajes.** Crear manuales técnicos y guías que detallen las estrategias implementadas y que faciliten su replicación.
- **Intervención en edificaciones adicionales.** Iniciar la aplicación del modelo ENC en al menos dos edificaciones más del campus dándole prioridad a aquellas con mayor consumo energético y baja IEQ.

c) Acciones a largo plazo (2040)

En el horizonte a largo plazo la meta es consolidar el modelo ENC en al menos el 50% de las edificaciones del campus, alcanzando objetivos de sostenibilidad y descarbonización. Las prioridades incluyen:

- **Ampliación del modelo ENC.** Garantizar que las estrategias implementadas cubran tanto edificaciones existentes como nuevas construcciones y renovaciones mayores.
- **Integración de energías renovables.** Asegurar que el 30 - 50% de la demanda energética total del campus sea cubierta por fuentes renovables.
- **Reducción del carbono embebido.** Implementar medidas para disminuir en un 40% el carbono embebido en los proyectos de renovaciones y nuevas construcciones.
- **Establecimiento de monitoreo continuo.** Consolidar sistemas centralizados de monitoreo que permitan evaluar el impacto de las estrategias y realizar ajustes necesarios.

7) Consideraciones para renovaciones y nuevas construcciones

Las renovaciones mayores y las nuevas construcciones representan oportunidades para implementar estrategias sostenibles que alineen las edificaciones de Univalle con los objetivos de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero Univalle. Estas intervenciones permiten incluir principios de diseño pasivo, tecnologías eficientes y energías renovables desde las etapas iniciales de diseño lo que permite maximizar el impacto en el desempeño energético y de Calidad Ambiental Interior (IEQ). Si bien el enfoque principal del caso de estudio está en edificaciones existentes, es fundamental incluir lineamientos específicos para proyectos de renovaciones y nuevas construcciones que aseguren que estas también contribuyan a la visión de sostenibilidad del campus universitario. Un ejemplo de diseño sostenible fue el Edificio de Laboratorios de Ingeniería Mecánica 344A, que fue concebido con estos objetivos en mente, diseñado completamente en la Univalle con los equipos de arquitectura e ingeniería mecánica con enfoque en bioclimática, y entregados sus respectivos planos constructivos, pero que no se priorizó por la administración del momento, y finalmente quedaron en espera.

a) Renovaciones mayores

Las renovaciones deben tratarse como una oportunidad para transformar las edificaciones existentes en modelos más sostenibles aplicando un enfoque que incluya:

- 1. Diagnóstico inicial:** Evaluar el consumo energético (EUI), las emisiones de CO_{2e} y las condiciones de IEQ antes de iniciar las intervenciones.
- 2. Optimización de recursos existentes:** Reutilizar materiales que estén en buenas condiciones, mejorar sistemas activos y modernizar infraestructuras relevantes.
- 3. Diseño pasivo:** Incorporar estrategias como aislamiento térmico, control solar y ventilación natural desde la planificación.
- 4. Integración de energías renovables:** Instalar sistemas fotovoltaicos y tecnologías de almacenamiento energético para reducir la dependencia de fuentes no renovables.
- 5. Gestión de residuos:** Implementar programas de recuperación y reciclaje para minimizar el impacto ambiental durante el proceso de renovación.

b) Nuevas construcciones

Las nuevas edificaciones deben diseñarse bajo un marco de diseño pasivo y Edificaciones Cero Energía (ECE) que les permita alcanzar un balance energético neto cero en operación (véase el diseño del Edificio 344A de Ingeniería Mecánica [88]). Las principales recomendaciones incluyen:

1. **Diseño arquitectónico eficiente:** Usar herramientas avanzadas como “*Building Information Modeling*” (BIM) para optimizar el diseño, reducir desperdicios y prever estrategias pasivas.
2. **Planificación para energías renovables:** Incluir infraestructura para sistemas solares fotovoltaicos, tecnologías de almacenamiento energético y otras fuentes renovables desde las etapas iniciales.
3. **Selección de materiales sostenibles:** Priorizar materiales certificados y fomentar el uso de recursos locales y de bajo impacto ambiental.
4. **Adaptación climática:** Diseñar edificaciones resilientes al cambio climático considerando las condiciones específicas del clima de Cali.

c) Indicadores de éxito

Para medir el impacto de las renovaciones mayores y nuevas construcciones se proponen los siguientes indicadores:

1. **Energía:** Reducción del EUI en un 50% respecto a edificaciones tradicionales y cobertura mínima del 30% de la demanda energética con fuentes renovables.
2. **Carbono embebido:** Disminuir el carbono embebido en un 40% para 2040 en renovaciones y nuevas construcciones.
3. **Carbono operacional:** Reducción de las emisiones operativas de CO_{2e} en un 30% para 2030 que permita avanzar hacia la neutralidad de carbono para 2040. Uso exclusivo de sistemas activos que utilicen refrigerantes de bajo GWP y tecnologías de alta eficiencia.
4. **Certificación:** Cumplimiento de estándares como ASHRAE bEQ, LEED, WELL, EDGE o equivalentes para garantizar la sostenibilidad de los proyectos.
5. **Calidad Ambiental Interior (IEQ):** Asegurar que los espacios cumplan con ASHRAE 55 y 62.1.

VIII. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo principal desarrollar una Hoja de Ruta para Edificaciones Neto Cero en el campus de la Universidad del Valle (Univalle) utilizando como base el caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería. Este objetivo se logró integrando estrategias de diseño pasivo, principios de Edificaciones Cero Energía (ECE) y Edificaciones Neto Cero (ENC) y el proceso de Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning como herramientas fundamentales para garantizar la sostenibilidad, la eficiencia energética y la Calidad Ambiental Interior (IEQ).

El caso de estudio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) permitió establecer líneas base de consumo energético y emisiones de CO_{2e} mediante una auditoría energética preliminar usando los lineamientos de bEQ de ASHRAE que permitió identificar las principales oportunidades de intervención en sistemas pasivos y activos. Esta edificación se convirtió en un modelo práctico y replicable para evaluar el impacto de estrategias como la optimización de la envolvente, uso de sistemas fotovoltaicos, control solar e iluminación natural. Además, el enfoque adoptado ofrece a Univalle una herramienta práctica para desarrollar y fortalecer políticas institucionales de sostenibilidad.

La propuesta técnica hecha se diferencia por la integración de la VTE o Commissioning en todas las etapas del ciclo de vida de la edificación, desde el diseño y la construcción hasta la operación. Esto asegura que las estrategias pasivas y activas como la optimización de la envolvente, el control solar, la ventilación e iluminación natural y la integración de sistemas eficientes y energías renovables sean implementadas de manera efectiva y cumplan con los objetivos de desempeño establecidos. A través del uso de herramientas de simulación como DesignBuilder se evaluaron el impacto energético y las emisiones de CO_{2e} de las estrategias propuestas, estableciendo líneas base y metas de reducción que guían el diseño y operación de edificaciones sostenibles en Univalle. Además, la Hoja de Ruta desarrollada proporciona un marco práctico y replicable que promueve la sostenibilidad ambiental, la eficiencia energética y la mejora de la IEQ.

A continuación, se presentan las conclusiones generales del trabajo seguidas de un análisis crítico que reflexiona sobre las fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora, así como recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones en el contexto institucional y regional.

A. Conclusiones generales

1) Impacto de las estrategias de diseño pasivo

Las estrategias de diseño pasivo propuestas en este trabajo se fundamentaron en lineamientos específicos que resultan especialmente eficaces para climas como el de Cali. Estas incluyen el control solar mediante dispositivos de sombreado como aleros y cortasoles, la optimización de la envolvente térmica con materiales de alta reflectancia y resistencia térmica, la ventilación natural para aprovechar las corrientes de aire y la iluminación natural ajustada a proporciones óptimas de ventana-pared.

Estas estrategias no solo reducen las cargas térmicas, el consumo energético y las emisiones de CO_{2e} sino que también mejoran significativamente las condiciones de confort térmico y lumínico, lo que es fundamental para espacios destinados a actividades académicas. Al proporcionar ambientes interiores más agradables y saludables estas medidas contribuyen a potenciar el aprendizaje y la productividad de los usuarios reflejando el impacto positivo del diseño pasivo en edificaciones de uso educativo.

2) Contribución de los lineamientos de construcción sostenible

Los lineamientos para la construcción de Edificaciones Neto Cero (ENC) en climas como el de Cali muestran la importancia de minimizar el impacto ambiental desde la fase constructiva. Se promueve la utilización de materiales sostenibles con bajas emisiones de carbono embebido y de origen local priorizando aquellos que optimicen el desempeño energético de las edificaciones. Además, se fomenta la gestión eficiente de recursos, incluyendo el reúso de materiales que estén en buen estado, el ahorro de agua, la reducción de residuos y la implementación de estrategias para minimizar el uso de energía en obra.

Estas acciones no solo favorecen la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones de CO_{2e} asociadas al proceso constructivo, sino que también contribuyen a alcanzar las metas de eficiencia energética desde el inicio de la obra. Estos lineamientos ofrecen un modelo constructivo replicable, adaptado al contexto local y alineado con los principios de sostenibilidad y descarbonización en edificaciones educativas.

3) Relevancia de los lineamientos de operación de edificaciones de alto desempeño

Los lineamientos para la operación eficiente de edificaciones desarrollados bajo los principios de Edificaciones Cero Energía (ECE), están orientados a optimizar el desempeño energético y ambiental a lo largo del ciclo de vida de las edificaciones. Estos lineamientos incluyen el uso de sistemas de monitoreo continuo para evaluar el consumo energético y las emisiones de CO_{2e}, permitiendo identificar ineficiencias y oportunidades de mejora. Además, se enfatiza la importancia de mantener condiciones óptimas de Calidad Ambiental Interior (IEQ) garantizando un entorno adecuado para las actividades académicas.

La implementación de planes de mantenimiento preventivo y predictivo asegura que tanto los sistemas pasivos como los activos operen conforme a los estándares definidos en el diseño y la construcción. Asimismo, la capacitación del personal operativo en el manejo de tecnologías avanzadas y herramientas de gestión energética es fundamental para garantizar la sostenibilidad en la operación. Estas acciones no solo contribuyen a reducir las emisiones de CO_{2e} y los costos de operación sino que también refuerzan el compromiso institucional de Univalle con la sostenibilidad y la descarbonización. Esta visión técnica y replicable contribuye al cumplimiento de los compromisos de descarbonización de la universidad permitiendo que las edificaciones sean resilientes, eficientes y sostenibles en el tiempo.

4) Rol de la Hoja de Ruta en la transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC)

La Hoja de Ruta desarrollada en este trabajo se fundamenta en un enfoque integral que combina estrategias de diseño pasivo, construcción sostenible y operación eficiente para convertir las edificaciones de Univalle en modelos de sostenibilidad y descarbonización. Basada en directrices internacionales como las de la Agencia Internacional de Energía (IEA), y adaptada al contexto local de Cali, esta hoja de ruta establece metas claras, hitos específicos y un marco práctico de implementación que garantiza su viabilidad técnica.

Este documento no solo ofrece un plan para alcanzar estándares de eficiencia energética y reducción de emisiones de CO_{2e} sino que también identifica barreras y oportunidades para la transición hacia edificaciones ENC. La propuesta incluye acciones específicas como la optimización de sistemas pasivos y activos, la incorporación de energías renovables y el uso de herramientas como la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning para

monitorear y mejorar continuamente el desempeño energético y la Calidad Ambiental Interior (IEQ).

La hoja de ruta no solo se limita al caso de estudio del edificio de la Escuela de Enfermería, sino que también proporciona un modelo escalable y replicable para otras edificaciones del campus y para instituciones similares. Al adoptar esta guía, Univalle puede posicionarse como líder en la transición hacia campus sostenibles contribuyendo de manera significativa a las metas globales de descarbonización y al fortalecimiento de su compromiso institucional con la sostenibilidad.

5) La VTE como pilar innovador en la transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC)

La Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning se presenta como un elemento innovador y transversal en esta propuesta técnica que permite la implementación efectiva de estrategias de sostenibilidad, eficiencia energética y Calidad Ambiental Interior (IEQ) en edificaciones institucionales. Este proceso, alineado con estándares internacionales como los de ASHRAE, garantiza que cada etapa del ciclo de vida de las edificaciones, desde el prediseño hasta la operación, cumpla con los objetivos definidos en los Requerimientos del Propietario del Proyecto (OPR) y las Bases del Diseño (BoD).

En la fase de diseño, la VTE verifica que las estrategias de diseño pasivo estén técnicamente justificadas y alineadas con las condiciones climáticas de Cali. Durante la construcción, asegura la correcta instalación y desempeño de los sistemas activos y pasivos minimizando errores y sobrecostos. En la operación, el proceso se extiende a través del retrocommissioning y recommissioning facilitando ajustes continuos para mantener el desempeño energético y las metas de sostenibilidad a lo largo del tiempo.

La inclusión de la VTE en esta propuesta técnica se destaca por su capacidad de integrar equipos multidisciplinarios, documentar lecciones aprendidas y garantizar que las metas iniciales de sostenibilidad se traduzcan en resultados medibles. Esto convierte a la VTE en una herramienta fundamental para la transición de Univalle hacia edificaciones resilientes, eficientes y sostenibles, y refuerza su potencial como modelo replicable en otros contextos educativos e institucionales.

6) Aportes del caso de estudio en la validación de estrategias hacia Neto Cero

El caso de estudio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU) se presentó como una oportunidad para analizar y validar estrategias hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) en un contexto

educativo. Este análisis permitió aplicar los conceptos desarrollados durante la línea de profundización en bioclimática de la Maestría en Arquitectura y Urbanismo, integrando de manera práctica estrategias de diseño pasivo, construcción sostenible y eficiencia energética.

La metodología bEQ de ASHRAE se utilizó como una herramienta fundamental para evaluar el desempeño energético actual de la EEU estableciendo líneas base de consumo de energía (EUI) de **39.4 kWh/m²-año** y emisiones de **13.1 tCO_{2e}-año**. Estas líneas base fueron contrastadas con los resultados obtenidos en los escenarios de simulación realizados en DesignBuilder, los cuales identificaron áreas prioritarias de intervención como la carga térmica excesiva y la iluminación natural deficiente en la mayoría de los espacios.

Las estrategias de diseño pasivo y las Medidas de Eficiencia Energética (MEE) lograron reducir el EUI a **22.8 kWh/m²-año** lo que representa una reducción del **42.1%** respecto a la línea base. Adicionalmente, se proyectó la incorporación de paneles solares fotovoltaicos para cubrir parcialmente las necesidades de iluminación artificial alcanzando un EUI de **21.9 kWh/m²-año**, lo que refleja una reducción total del **44.4%**. En términos de emisiones de CO_{2e}, las estrategias implementadas permitieron una disminución significativa con un valor proyectado de **4.6 tCO_{2e}-año** lo que equivale a una reducción del **64.9%** respecto a las emisiones iniciales.

En cuanto a la Calidad Ambiental Interior (IEQ), aunque la mejora en la iluminación natural no fue suficiente para eliminar el uso de iluminación artificial en el día, si demuestra que un diseño arquitectónico enfocado en permitir niveles óptimos de iluminación natural junto con estrategias para minimizar las ganancias solares y favorecer la ventilación natural, claramente pueden ayudar a disminuir la temperatura media radiante y mejorar las renovaciones de aire en los espacios lo que trae un impacto positivo en los procesos de aprendizaje en entornos de uso académico.

Estos resultados confirman que las estrategias de diseño pasivo combinadas con tecnologías de eficiencia energética y energías renovables son efectivas para avanzar hacia el cumplimiento de metas de reducción alineadas con los compromisos nacionales de sostenibilidad. Además, este caso de estudio establece un modelo replicable para otras edificaciones del campus contribuyendo a la consolidación de una hoja de ruta hacia la descarbonización institucional.

7) Impacto institucional de la propuesta técnica

La propuesta técnica desarrollada en esta tesis representa una contribución significativa para posicionar a Univalle como un referente en sostenibilidad y descarbonización en el ámbito

educativo. La integración de estrategias de diseño pasivo, construcción sostenible y operación eficiente de edificaciones combinadas con la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning, establece un marco práctico y escalable que puede ser replicado en todo el campus y en instituciones con contextos similares.

Además, esta propuesta abre un amplio abanico de posibilidades en los ámbitos académicos y de investigación. Permite generar conocimiento aplicado sobre la implementación de estrategias hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) que promueve la exploración de nuevas propuestas en eficiencia energética, Calidad Ambiental Interior (IEQ) y diseño bioclimático. También ofrece oportunidades para desarrollar proyectos de investigación interdisciplinarios que involucren a estudiantes y docentes en la búsqueda de soluciones innovadoras para el desarrollo de campus sostenibles.

Al adoptar herramientas para realizar auditorías energéticas y simulaciones junto con lineamientos claros para cada etapa del ciclo de vida de las edificaciones, Univalle dispone de una hoja de ruta técnica que guía su transición hacia un campus más resiliente, eficiente y comprometido con la descarbonización. Este modelo no solo tiene un impacto positivo en la comunidad universitaria, sino que también sirve como un ejemplo replicable para otras instituciones educativas y académicas de la región.

B. Análisis crítico

Este trabajo inició como una idea que en un principio subestimé pero que con el tiempo se convirtió en una propuesta muy completa y robusta. Al plantear objetivos tan amplios me vi enfrentado al reto de abordar múltiples temas que, fácilmente, podrían haber sido desarrollados como tesis individuales. Sin embargo, logré integrar cada uno de ellos de manera aceptable y con el nivel técnico necesario aunque en algunos puntos sentí que la amplitud de los temas limitó la profundidad que hubiera deseado alcanzar.

El caso de estudio fue uno de los mayores desafíos, no solo por la recolección de datos y el trabajo de campo necesario, sino también por la complejidad de proyectar soluciones sin llegar a implementarlas físicamente y medir su impacto real. La participación en el programa CEELA fue una experiencia enriquecedora la cual me permitió ampliar el enfoque metodológico y aprender de expertos internacionales. Sin embargo, considero que hubiese sido más valioso realizar más talleres

de parte nuestra, involucrar a un mayor número de expertos y lograr una mayor aceptación por parte del personal técnico y administrativo de la universidad. Esto habría incrementado el impacto y validado aún más las estrategias desarrolladas.

Durante el desarrollo de la Hoja de Ruta, logré identificar que existen grandes oportunidades para futuros trabajos académicos. Esta herramienta tiene el potencial de generar investigaciones adicionales, como la creación de guías técnicas para su implementación o el diseño de procedimientos específicos que aseguren su viabilidad. Este trabajo dejó claro que existen barreras importantes para llevar estas propuestas a la práctica pero también oportunidades para seguir explorando su implementación.

Uno de los aspectos más relevantes que identifiqué en este trabajo es la propuesta de la Validación Técnica de la Edificación (VTE) o Commissioning. Considero que es una herramienta relevante que rompe con las limitaciones de certificaciones internacionales como LEED, que solo exigen procesos como el Commissioning para proyectos que buscan certificarse. La VTE propone una solución que puede aplicarse a cualquier proyecto, lo que la hace más práctica, accesible y útil en el contexto local. Además, creo que esta propuesta ayuda a combatir el creciente problema del “greenwashing”²⁶, ofreciendo un enfoque práctico, medible y replicable para alcanzar metas de sostenibilidad.

En retrospectiva, siento que este trabajo fue ambicioso pero bien logrado. Aunque pudo ser más compacto, estoy satisfecho con el resultado porque logré consolidar todo lo aprendido durante los diferentes cursos de la línea bioclimática de la Maestría en Arquitectura y Urbanismo de Univalle, en un marco técnico y práctico que no solo es aplicable a Univalle, sino que puede replicarse en otros ámbitos y por supuesto ser usado en el contexto de mis actividades profesionales con mi empresa Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S.

C. Recomendaciones

1) Fortalecer los lineamientos de construcción sostenible

Realizar investigaciones específicas sobre materiales y técnicas constructivas adaptadas al clima de Cali y colaborar con expertos en construcción sostenible podría enriquecer las propuestas

²⁶ Acto de engañar o confundir al público sobre las prácticas sostenibles de una empresa o los beneficios ambientales de un producto o servicio.

y garantizar su viabilidad técnica y ambiental lo que permite fortalecer el impacto de estas estrategias. Además, tecnificar las edificaciones con sistemas de medición para poder robustecer la base de datos, los índices energéticos y de IEQ.

2) Desarrollar guías técnicas para la Hoja de Ruta

Complementar la Hoja de Ruta con guías prácticas que detallen los pasos para su implementación es esencial. Estas guías deben incluir procedimientos estandarizados para el monitoreo, evaluación del desempeño energético y recomendaciones específicas para edificaciones de diferentes tipologías.

3) Ampliar el alcance de la Validación Técnica de la Edificación (VTE)

Diseñar estrategias de promoción para la VTE y realizar talleres de capacitación dirigidos a profesionales del sector permitirá fomentar su adopción como herramienta clave para la sostenibilidad en edificaciones. Expandir su alcance más allá de proyectos certificados sería un paso crucial para garantizar su aplicabilidad universal.

4) Realizar proyectos piloto basados en las proyecciones del caso de estudio

Implementar proyectos piloto permitirá validar las estrategias propuestas y medir su impacto real en términos de reducción de consumo energético y emisiones de CO_{2e}. Estos proyectos también proporcionarían datos empíricos que podrían ser utilizados en futuras investigaciones y validaciones.

5) Integrar tecnologías emergentes como internet de las cosas (IoT) e inteligencia artificial (IA)

Incorporar tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA) en el monitoreo y gestión de edificaciones sostenibles puede optimizar el control energético, identificar ineficiencias en tiempo real y permitir ajustes automáticos en los sistemas pasivos y activos. Estas herramientas, aplicadas en contextos educativos, mejorarán el desempeño energético y facilitarán la recopilación de datos precisos para investigaciones futuras.

6) *Incorporar principios de economía circular*

Fomentar la economía circular en la construcción sostenible implica priorizar el reúso de materiales, diseñar edificios desmontables y minimizar residuos mediante cadenas de suministro más eficientes. Este enfoque puede reducir significativamente las emisiones embebidas y optimizar el uso de recursos en todas las fases del ciclo de vida de las edificaciones.

7) *Fomentar la colaboración interdisciplinaria e institucional*

Involucrar a actores administrativos, técnicos y académicos en investigaciones futuras permitirá consolidar un enfoque integral y viable para la sostenibilidad. Promover espacios de diálogo y capacitación en sostenibilidad dentro de la comunidad universitaria será clave para garantizar la implementación de las estrategias propuestas.

8) *Abordar el problema del “greenwashing”*

Generar criterios claros y medibles para evaluar la sostenibilidad de las edificaciones es crucial para evitar prácticas de “greenwashing”. Promover herramientas como la VTE ayudará a consolidar estrategias de sostenibilidad transparentes y medibles, fortaleciendo la confianza en las soluciones propuestas.

D. Reflexión final

Este trabajo ha demostrado que la transición hacia Edificaciones Neto Cero (ENC) es tanto posible como necesaria para enfrentar los desafíos del cambio climático y promover la sostenibilidad en el sector de la construcción. A través del caso de estudio de la Escuela de Enfermería de Univalle (EEU), se identificaron estrategias efectivas de diseño pasivo, eficiencia energética y uso de energías renovables que pueden replicarse en otras edificaciones de la universidad y en instituciones con contextos similares. La implementación de la Hoja de Ruta Edificaciones Neto Cero no solo contribuirá a reducir la huella de carbono de la institución, sino que también se posiciona como un modelo estratégico para otras organizaciones que buscan alinearse con metas globales de sostenibilidad.

Sin embargo, el camino hacia ENC presenta desafíos importantes. Barreras como la adopción de nuevas tecnologías, la capacitación del personal y las inversiones iniciales deben ser

gestionadas para asegurar la viabilidad de estas estrategias. En este sentido, es crucial que instituciones educativas como Univalle asuman un papel de liderazgo, promoviendo no solo la implementación de tecnologías y estrategias sostenibles, sino también la educación y concientización de la comunidad universitaria y de la sociedad en general.

En conclusión, este trabajo valida la viabilidad de las estrategias propuestas y sienta las bases para futuras investigaciones y proyectos piloto que puedan profundizar en el desarrollo de edificaciones sostenibles. La transición hacia un modelo de ENC requiere un compromiso conjunto de todos los actores involucrados, desde diseñadores y constructores hasta los usuarios finales. Este esfuerzo es un paso crucial para construir un futuro más sostenible y saludable para las próximas generaciones.

Finalmente, esta maestría y el desarrollo de esta tesis, ha permitido que dentro de mi ejercicio profesional como Consultor en Climatización integre nuevos conocimientos que han facilitado la participación en proyectos de índole netamente bioclimático lo cual abre un abanico de posibilidades para integrar nuevas técnicas, herramientas y servicios dentro de los proyectos que desarrollamos en Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S. También he podido consolidarme en otras temáticas en mi rol como conferencista internacional, abordando temas más integrales como las auditorías energéticas con bEQ, estrategias de diseño pasivo y Edificaciones Cero Energía (ECE).

IX. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, «2024 Global Status Report for Buildings and Construction,» Nairobi, 2024.
- [2] W. Fisk, «Climate Change, Energy Efficiency, and IEQ: Challenges and Opportunities for ASHRAE,» Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of the Building Technologies Program, U.S. Department of Energy, Berkeley.
- [3] Unidad de Planeación Mineroenergética, «UPME,» [En línea]. Available: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECOEnergetico.aspx>. [Último acceso: 03 11 2022].
- [4] Gobierno de Colombia, «Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono,» Bogotá, 2022.
- [5] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, Universidad de los Andes, «Proyecto Edificaciones Neto Cero-Carbono Colombia: Línea base de emisiones GEI de las edificaciones en Colombia,» Bogotá, 2022.
- [6] ASHRAE, ASHRAE GreenGuide Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings Sixth Edition, Atlanta, 2023.
- [7] Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Ley 1844,» 2017.
- [8] Naciones Unidas, «Acuerdo de París,» París, 2015.
- [9] United Nations Environment Programme, «2021 Global Status report for Buildings and Construction,» United Nations Environment Programme, Nairobi, 2021.
- [10] Universidad del Valle, «Plan Estratégico de Desarrollo 2015-2025,» Oficina de Planeación y Desarrollo Institucional, Cali, 2015.
- [11] O. Eric, A. P. Chan y A. Darko, «Review of global research advances towards net-zero emissions buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 266, n° 112142, 2022.
- [12] P. La Roche, Carbon-Neutral Architectural Design, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [13] M. Shirinbakhsh y L. D. Harvey, «Net-zero energy buildings: The influence of definition on greenhouse gas emissions,» *Energy and Buildings*, vol. 247, 2021.

- [14] H. Omrany, «A bibliometric review of net zero energy building research 1995–2022,» *Energy & Buildings*, n° 262, p. 19, 2022.
- [15] International Energy Agency, «Energy Technology Roadmaps: A guide to development and implementation,» IEA, 2014.
- [16] E. Crowe, E. Mills, T. Poeling, C. Curtin, D. Bjørnskov, L. Fischer y J. Granderson, «Building commissioning costs and savings across three decades and 1500 North American buildings,» *Energy & Buildings*, p. 227, 2020.
- [17] E. Mills, «Building Commissioning. A Golden Opportunity for Reducing Energy Costs and Greenhouse Gas Emissions,» Berkeley, 2009.
- [18] Building Commissioning Association, Lawrence Berkeley National Laboratory, «Value of Commissioning 2018 Market Survey,» Estados Unidos, 2018.
- [19] International Energy Agency, «Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector,» IEA, 2021.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, New York, 2012.
- [21] New Buildings Institute, Lifecycle GHG Impacts in Building Codes, Portland, 2022.
- [22] D. A. Alarcón Barrera, Tesis: Mejoramiento del confort térmico y reducción de emisiones de CO₂ de una vivienda urbana en Santiago de Cali, Santiago de Cali, 2021.
- [23] G. Hammond y C. Jones, «A BSRIA Guide. Embodied Carbon. The Inventory of Carbon and Energy (ICE),» BSRIA BG, Bath, England, 2011.
- [24] «One Click LCA,» 2024. [En línea]. Available: <https://oneclicklca.com>. [Último acceso: 10 12 2024].
- [25] United States Government, «Energy Star,» [En línea]. Available: <https://www.energystar.gov/about/how-energy-star-protects-environment/energy-efficiency>. [Último acceso: 09 05 2024].
- [26] ASHRAE, Procedures for Commercial Building Energy Audits, Atlanta: ASHRAE, 2011.
- [27] ASHARE, «Position Document on Energy Efficiency in Buildings,» ASHRAE, Atlanta, 2023.

- [28] Ministerio de Minas y Energía, «Primer balance de energía útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética,» Bogotá, 2018.
- [29] ASHRAE, High-Performance Buildings Simplified Designing, Constructing, and Operating Sustainable Commercial Buildings, Atlanta: ASHRAE, 2019.
- [30] DesignBuilder. v7.0.2.6, DesignBuilder Software Ltd, 2024.
- [31] ASHRAE, «Building EQ,» ASHRAE, [En línea]. Available: <https://www.ashrae.org/technical-resources/building-eq>. [Último acceso: 19 08 2024].
- [32] H. Altan y T. K. Aoul, «Passive Design,» de *ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes*, Melbourne, Springer Tracts in Civil Engineering, 2017, pp. 209-236.
- [33] N. Lechner, Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects, New Jersey: Wiley, 2015.
- [34] «Heliodons,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.heliodons.org/assets/three-tier-poster.jpg>. [Último acceso: 06 01 2023].
- [35] M. Santamouris y D. Asimakopoulos, Passive Cooling of Buildings, New York: Earthscan, 2013.
- [36] IDEAM, «Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia,» Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, 2017.
- [37] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2019.
- [38] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), «Estudio para la Microzonificación Climática para el Municipio de Santiago de Cali,» Cali, 2015.
- [39] M. Santamouris y D. Kolokotsa, «Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art,» *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 74-94, 2013.
- [40] D. K. Bhamare, M. K. Rathod y J. Banerjee, «Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art,» *Energy & Buildings*, vol. 198, pp. 467-490, 2019.

-
- [41] Y. Elaouzy y A. El Fadar, «Energy, Economic and Environmental Benefits of Integrating Passive Design Strategies into Buildings: A Review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, n° 112828, p. 18, 2022.
- [42] V. Olgyay, *Design With Climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, New Jersey: Princeton University Press, 2015.
- [43] B. Raji, M. J. Tenpierik y A. van den Dobbela, «The impact of greening systems on building energy performance: A literature review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 610-623, 2015.
- [44] Alcaldía de Santiago de Cali, «Manual de Construcción Sostenible del Distrito de Santiago de Cali,» Santiago de Cali, 2023.
- [45] Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S., *Climatización Edificio Aulas Escuela Nacional del Deporte*, Cali, 2024.
- [46] ASHRAE, 2021 ASHRAE Handbook Fundamentals, Atlanta, GA: ASHRAE, 2021.
- [47] ASHRAE, *Design Guide for Natural Ventilation*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2021.
- [48] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2022.
- [49] ASHRAE, 2019 ASHRAE Handbook Applications, Atlanta, GA: ASHRAE, 2019.
- [50] K. Karthik Panchabikesan, K. Vellaisamy y V. Ramalingam, «Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1235-1252, 2017.
- [51] University of California Los Angeles (UCLA), *Climate Consultant 6.0*, Los Angeles, California, 2008.
- [52] National Renewable Energy Laboratory, «Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition,» de *ACEEE Summer Study*, Pacific Grove, 2006.
- [53] Elsevier, *Handbook of Energy Efficiency in Buildings*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [54] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 228-2023 Standard Method of Evaluating Zero Net Energy and Zero Net Carbon Building Performance*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2023.
- [55] U.S. Department of Energy, «A Common Definition for Zero Energy Buildings,» 2015.

- [56] Ministerio de Minas y Energía, «Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE),» Unidad de Planeación Minero-Energética, Bogotá, 2022.
- [57] World Resources Institute, *Accelerating Building Decarbonization: Eight Attainable Policy Pathways to Net Zero Carbon Buildings for All*, Washington, DC: World Resources Institute, 2019.
- [58] U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, «National Definition of a Zero Emissions Building. Part 1: Operational Emissions from Energy Use, Version 1,» U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585, 2024.
- [59] United Kingdom Green Building Council, *Net Zero Carbon Buildings: A Framework Definition*, London: UKGBC, 2019.
- [60] A. H. Smets, I. Olindo, K. Jäger, R. ACMM van Swaaij y M. Zeman, *Solar Energy The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, Cambridge, 2015.
- [61] Z. u. R. Tahir, A. Kanwal, M. Z. Jamil, I. Amin, M. Abdullah, U. Bin Saeed y A. Tariq, «Performance assessment of commercial wind turbines for low wind speed regions,» *Wind Engineering*, p. 24, 2024.
- [62] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, «Actualización del Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052,» MInisterio de Minas y Energía, Bogotá, 2023.
- [63] Gobernación del Valle del Cauca, «[www.valledelcauca.gov.co](https://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones/83519/para-el-valle-la-transicion-energetica-no-es-una-opcion-sino-una-necesidad-dilian-francisca-toro/),» Ingrid Valderruten Peña. Periodista Gobernación del Valle del Cauca, 28 Agosto 2024. [En línea]. Available: <https://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones/83519/para-el-valle-la-transicion-energetica-no-es-una-opcion-sino-una-necesidad-dilian-francisca-toro/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2024].
- [64] ASOCAÑA, «INFORME ANUAL 2023-2024,» ASOCAÑA, Cali, 2024.
- [65] D. García de Frutos, M. Islán Marcos, A. Verdú Vázquez y J. M. García Alonso, «Los espacios educativos como factor influyente en el aprendizaje. Percepción del rendimiento según las condiciones ambientales interiores,» *Advances in Building Education*, vol. 2, nº 2, pp. 32-44, 2018.

- [66] J. G. Allen y J. D. Macomber, *Healthy Buildings. How Indoor Spaces Drive Performance and Productivity*, Cambridge, Massachusetts: President and Fellows of Harvard College, 2020.
- [67] C. A. Herrera y M. E. Rosillo, *Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones. Un enfoque práctico.*, Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2019.
- [68] P. Wargocki y D. P. Wyon, «The Effects of Moderately Raised Classroom Temperatures and Classroom Ventilation Rate on the Performance of Schoolwork by Children (RP-1257),» *HVAC&R Research*, vol. 13, n° 2, pp. 193-220, 2007.
- [69] F. Tartarini, S. Schiavon, T. Cheung y T. Hoyt, «CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. SoftwareX 12, 100563,» Center for the Built Environment (CBE), University of California Berkeley (USA), 2020. [En línea]. Available: <https://comfort.cbe.berkeley.edu>. [Último acceso: 29 11 2024].
- [70] T. Hoyt, «CBE 3D Mean Radiant Temperature Tool,» Center for the Built Environment (CBE), University of California at Berkeley (USA), 2016. [En línea]. Available: <https://cbe.berkeley.edu/research/cbe-3d-mean-radiant-temperature-tool/>. [Último acceso: 29 11 2024].
- [71] D. P. Wyon y P. Wargocki, «How Indoor Environment Affects Performance,» *ASHRAE Journal*, pp. 46-52, 2013.
- [72] P. Wargocki, J. A. Porras-Salazar, S. Contreras-Espinoza y W. Bahnfleth, «The relationships between classroom air quality and children's performance in school,» *Building and Environment*, vol. 173, 2020.
- [73] ASHRAE, *Advanced Energy Design Guide for K-12 School Buildings. Achieving 30% Energy Savings Toward a Net Zero Energy Building*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2008.
- [74] T. Tomei G, Z. F, M. Ercolani M y C. Chioyenda P, «Effetti sull'attenzione per esposizione a rumore da traffico urbano [Exposure to traffic noise and effects on attention],» *National Library of Medicine National Center for Biotechnology Information*, p. 19, 2006.
- [75] World Green Building Council, «Health, Wellbeing & Productivity in Offices. The next chapter for green building,» World Green Building Council, London.

- [76] M. Miedzinska, W. McDowalla, J. Fahnestock, O. Rataja y G. Papachristos, «Paving the pathways towards sustainable future? A critical assessment of STI policy roadmaps as policy instruments for sustainability transitions,» *Futures*, vol. 142, n° 103015, p. 15, 2022.
- [77] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE/IES Standard 202-2018 Commissioning Process for Buildings and Systems*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2018.
- [78] ASHRAE, *Guideline 0-2019. The Commissioning Process*, Atlanta, 2019.
- [79] ASHARE, *ASHRAE Guideline 0-2019. The Commissioning Process*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2019.
- [80] R. Chudley y R. Greeno, *Building Construction Handbook*. Tenth Edition, London, UK: Routledge, 2014.
- [81] World Green Building Council, «Bringing Embodied Carbon Upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon,» World Green Building Council, London, UK, 2019.
- [82] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, «Hoja de Ruta de Sostenibilidad para Materiales de Construcción,» Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, Bogotá, Colombia, 2021.
- [83] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE/ICC/USGBC/IES Standard 189.1-2020, Standard for the Design of High Performance, Green Buildings*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2020.
- [84] S. Herrera, *Árboles de la Universidad del Valle*, Cali, COL: Programa Editorial de la Universidad del Valle, 2009.
- [85] H. Hurtado y Stella, «Manejo de la Arborización en el Control Climático,» Cali, 2014.
- [86] ASHARE, *Fundamentals of Building Operation, Maintenance, and Management*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2011.
- [87] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE/ACCA Standard 180-2018. Standard Practice for Inspection and Maintenance of Commercial Building HVAC Systems*, Atlanta, GA: ASHRAE, 2018.
- [88] H. Delgado B, *Propuesta para el Diseño de la Climatización Pasiva del Edificio 344A*, Cali, COL, 2019.
- [89] IEA, «Buildings,» IEA, 2024. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/buildings>.

- [90] K. Jarek, A. Francis, B. Derrick, G. Guillaume, H. Per, J. Lennart, K. Risto, L. Jean, M. Livio, S. O. Railio Jorma, S. Michael y V. Maija, «How to define nearly net zero energy buildings nZEB,» *REHVA Journal*, pp. 1-7, 2011.
- [91] Meteoblue AG, «Meteoblue,» [En línea]. Available: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/santiago-de-cali_colombia_3687925. [Último acceso: 25 08 2024].
- [92] R. Mayfield, *Photovoltaic Design and Installation For Dummies*, Wiley, 2019.
- [93] P. M. U. S. S. J. V. a. J. D. S. Joseph G. Allen, «Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments,» *Environmental Health Perspectives*, pp. 805-812, 2016.
- [94] Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS, «Protocolo de Verificación para Sistemas Ingenieriles de Vnetilación Natural,» Consejo Colombiano de Construcción Sostenible CCCS, Bogotá, 2015.
- [95] AECOM Ltd, «Daylight in Buildings. Energy Conservation in Buindings & Community Systems & Solar Heating and Cooling Programmes,» AECOM Ltd on behalf of the International Energy Agency, Birmingham, UK, 2010.

X. APÉNDICES

Apéndice I. Table 10 Refrigerant Global Warming Potential (GWP) [54]

Table 10 Refrigerant Global Warming Potential (GWP)

Refrigerant Type	GWP, kg CO ₂ e/kg refrigerant
HCFC-22	1760
HCFC-123	79
HFC-134a	1300
HC-290 (propane)	5
R-404A	4970
R-407C	1620
R-408A	3260
R-410A	1920
R-438A	2060
R-504	4300
R-717 (ammonia)	0
R-744 (CO ₂)	1
Other	Note a.

a. To be approved by the AHJ.

Informative Note: Information on the 100-year factors for other refrigerants are available in *ASHRAE Handbook—Fundamentals* (2017) Chapter 29 Tables 3B and 4 (AR5).

#	Nombre y tipo de área	Área Neta		Horas de Operación Semanal		Horas de Operación Semanal		# Semanas al año		# Ocupantes		PCs e Impresoras				Iluminación				Aire Acondicionado				Otro				
		Piso	m²	f2	Piso	Parcial	Piso	Parcial	Piso	Parcial	Piso	Parcial	Port.	Escr.	Impr.	Potencia (W)	Consumo (kWh)	Can.	Potencia (W)	Consumo (kWh)	MS / PT / CS / VN / CT / EE	Potencia (Btu/h)	Consumo (kWh)	Can.	Potencia (W)	Consumo (kWh)	Comentarios	
1	ADMON DIR. ESCUELA	1	39	424	45	45			48	48	5	3	7	2	703	1518	16	288	622	MS	24000	1814	1	385	166		Cafetera	
2	OFICINA (OFICINA 1)	1	54	580	45	45			48	48	10	7	7	2	869	1877	14	252	544	MS	18000	2799	0					
3	OFICINA DIRECTORA	1	53	574	45	45			48	48	7	2	1	1	273	590	6	108	233	MS	24000	1711	1	50	22		TV 40"	
4	OFICINA RECURSOS HUMANOS	1	69	746	45	45			48	48	18	5		2	3	574	1240	14	252	544	MS	24000	3110	0				
5	PASILLO (OFICINAS)	1	69	564	45	45			48	48						14	252	544										
6A	OF ENFERMERÍA 1	1	9	313	45	45			48	48	5	2	1	1	273	590	23	414	894	MS	18000	1750	1	50	22		TV 40"	
6B	OF ENFERMERÍA 2	1	13	472	45	45			48	48	5	1	1	1	227	490												
6C	OF ENFERMERÍA 3	1	12	423	45	45			48	48	5	2	1	1	153	330												
7	ENFERMERÍA PASILLO	1	30	317	45	45			48	48					1	116	251											
8	SALON 124	1	65	700	30	30			34	32	30	18		1	107	103	18	324	311	MS	24000	1198	1	308	296		Videobeam	
9	SALA MULTIMEDIOS	1	60	649	30	30			34	32	30	18		1	107	103	18	324	311	MS	36000	1555	1	308	296		Videobeam	
10	AUDITORIO	1	173	1859	30	30			34	32	120	72			2087	2004	37	543	521	CT	180000	6912	1	308	296		Videobeam	
11	SALON BLANCO	1	27	295	30	30			34	32	16	10			0	5	250	240	MS	24000	1060	0						
12A	OF POSGRADOS 1	1	18	194	45	45			48	48	6	1	1	1	307	663	14	108	234	MS	18000	2061	0					
12B	OF POSGRADOS 2	1	15	158	45	45			48	48	3	2	2	1	334	721		88	190									
12C	OF POSGRADOS 3	1	9	99	45	45			48	48	3	2	1	1	273	590		55	120									
17	OF POSGRADOS PASILLO	1	17	181	45	45			48	48					0	101	219											
14	PASILLO EXTERNO	1	183	1963	30	30			5	5	48	48	10	5		0	10	180	43									
15	INVESTIGACION	1	67	718	45	45			48	48	12	6		6	2	882	1905	16	288	622	MS	36000	2566	1	50	2		TV 40"
16	CUARTO DE CONTROL	1	4	45	3	3			48	48					0	2	36	5	VN	9000	17	1	100	14				Rack comunicación
17	SALON 201	2	83	873	30																							

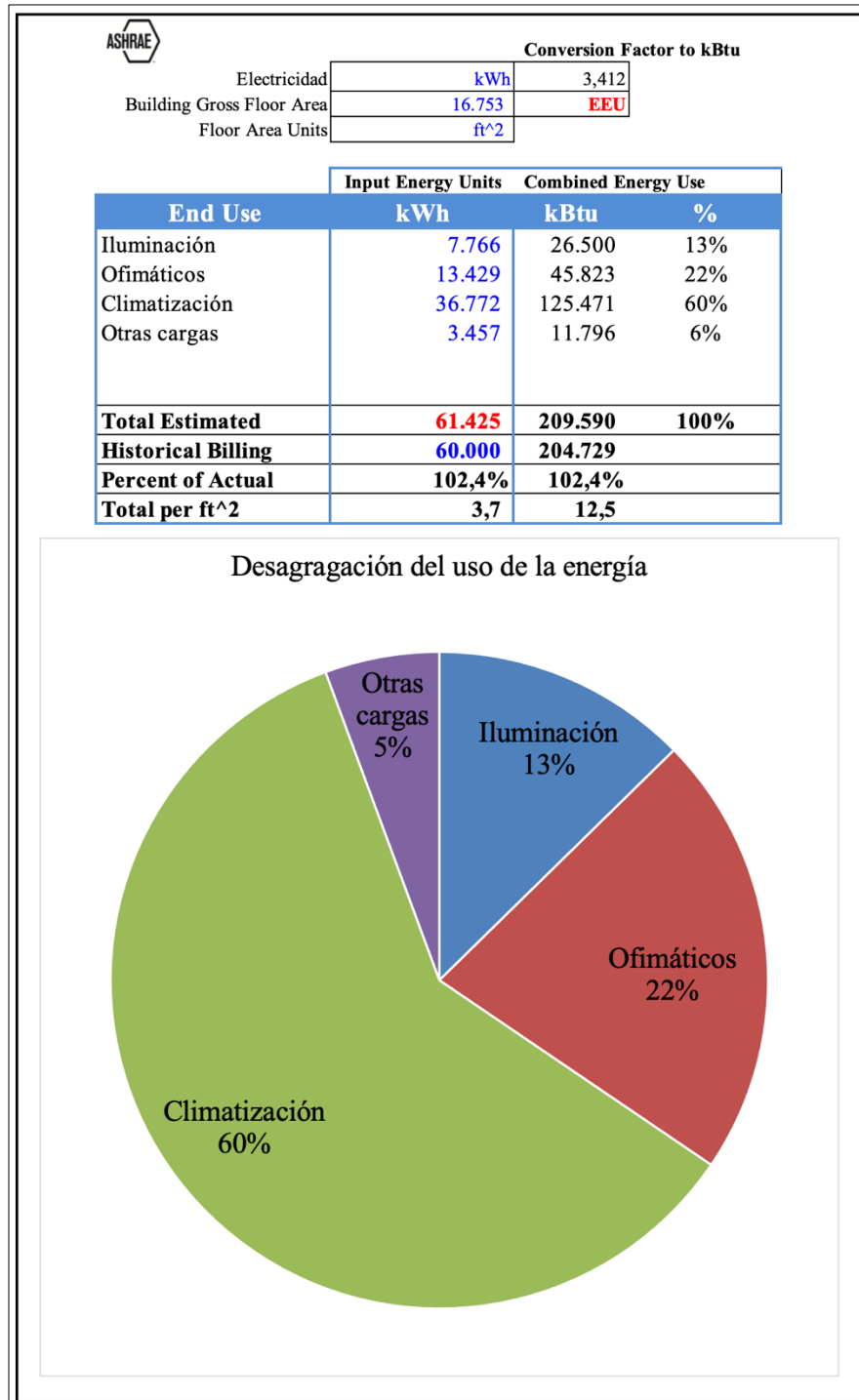
Apéndice III. Formato ASHRAE “*Preliminary Energy-Use Analysis*”: Registro de datos de facturas de servicios públicos.

ELECTRIC									
Utility/Supplier Name		EMCALI							
Account Number		1300273							
Meter Number		U4PV_63063426							
YEAR: 2022									
Month	Bill Date	Days in Period	Ave. Temp. (C)	Actual Demand (kW)	Billed Demand (kW)	Electric Use (kWh)	Electric Use (\$)	Other Fees (\$)	Total Bill (\$)
January	8/01/22	29	33	5.303	5.255	3.840	\$664,1	\$31.075	\$2.581.142
February	15/02/22	32	31	5.325	5.303	1.760	\$684,0	\$37.161	\$1.241.001
March	11/03/22	31	31	5.379	5.325	4.320	\$704,5	\$19.048	\$3.062.574
April	8/04/22	28	32	5.430	5.379	4.080	\$725,7	\$18.798	\$2.979.491
May	9/05/22	32	32	5.490	5.430	4.800	\$761,9	\$25.066	\$3.682.378
June	7/06/22	30	33	5.588	5.490	7.840	\$769,6	\$18.622	\$6.051.973
July	6/07/22	29	31	5.644	5.588	4.480	\$808,0	-\$94.715	\$3.525.305
August	4/08/22	32	32	5.724	5.644	6.400	\$830,8	\$22.544	\$5.339.344
September	5/09/22	31	32	5.791	5.724	5.360	\$801,0	\$34.389	\$4.327.535
October	7/10/22	28	32	5.843	5.791	4.160	\$837,6	\$21.880	\$3.506.212
November	4/11/22	32	31	5.935	5.843	7.360	\$803,2	\$21.568	\$5.933.193
December	5/12/22	30	31	6.005	5.935	5.600	\$773,8	\$70.749	\$4.404.085
Annual Totals						60.000	\$9.164	\$226.186	\$46.634.234
Peak Demand (kW)				6.005					
Total Annual Cost (\$)				\$46.634.234					
© 2011 ASHRAE									

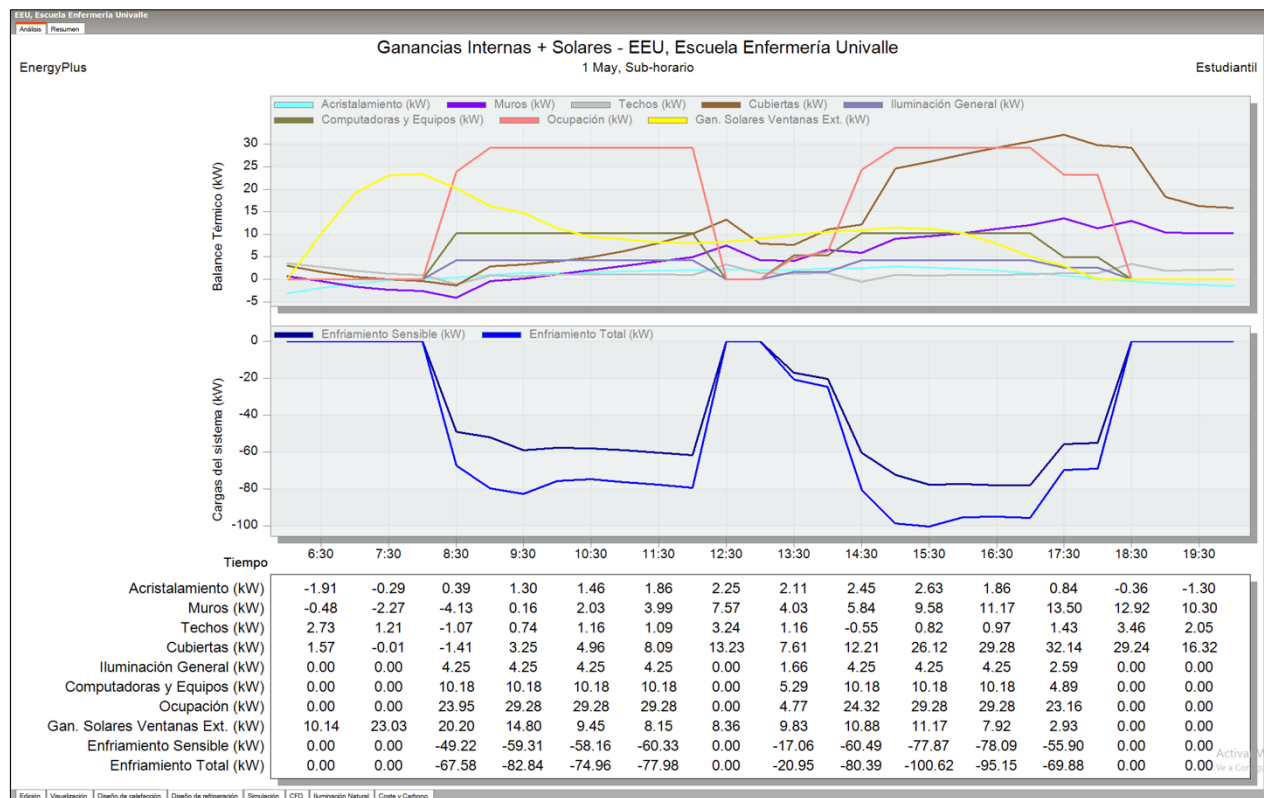
Apéndice IV. Formato ASHRAE “*Preliminary Energy-Use Analysis*”: Cálculo de EUI en kWh/m²-año y emisiones en tCO₂e-año.

					
Energy Type	Total Annual Use	Units	Conversion Multiplier	kBtu	Total Annual Cost (\$)
Electricidad Edificio Escuela Enfermería Univalle (EEU)	61.425	kWh	3,4121	209.590	\$ 46.634.234
Total	61.425			209.590	\$ 46.634.234
Edificio Escuela Enfermería Univalle (EEU)					
Area Evaluada (ft2) - (m2)			16.753	1.557	
EUI (kBtu/ft^2) - (kWh/m2) / año - CALCULADO			12,5	39,4	
EUI Resolución 0549 Colombia (kBtu/ft^2) - (kWh/m2) / año			9,5	29,8	
EUI Porfolio Manager USA (kBtu/ft^2) - (kWh/m2) / año			84,3	133,9	
EUI Building and Construction Authority of Singapore (kBtu/ft^2) - (kWh/m2) / año			31,5	99,0	
ECI (\$/ft2) - (\$/m2) / año - CALCULADO			2.784	29.948	
tCO2e sitio - tCO2e fuente / año - CALCULADO			7,7	24,9	
1 kBTU = 0,2930711 kWh 0,126 tCO2e = 1 MWh 1 kWh eléctrico en fuente = 0,31 kWh eléctrico en sitio; factor 3,22 Resolución 0549 de 2015 el EUI de referencia es 72 kWh/m2-año para clima calido seco y 29,8 kWh/m2-año para clima cálido humedo					

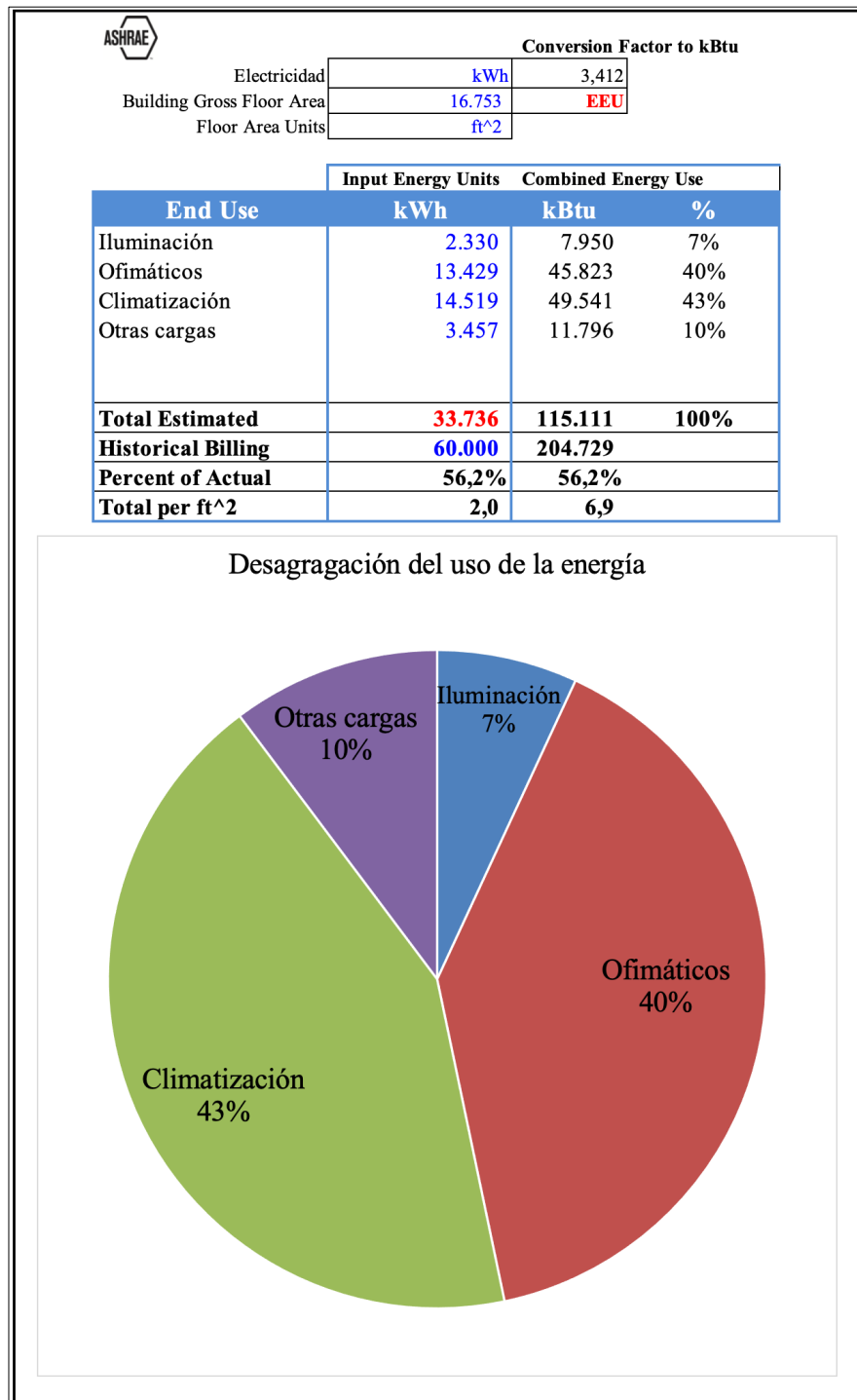
Apéndice V. Formato ASHRAE “*Preliminary Energy-Use Analysis*”: Desagregación de uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) según PEA



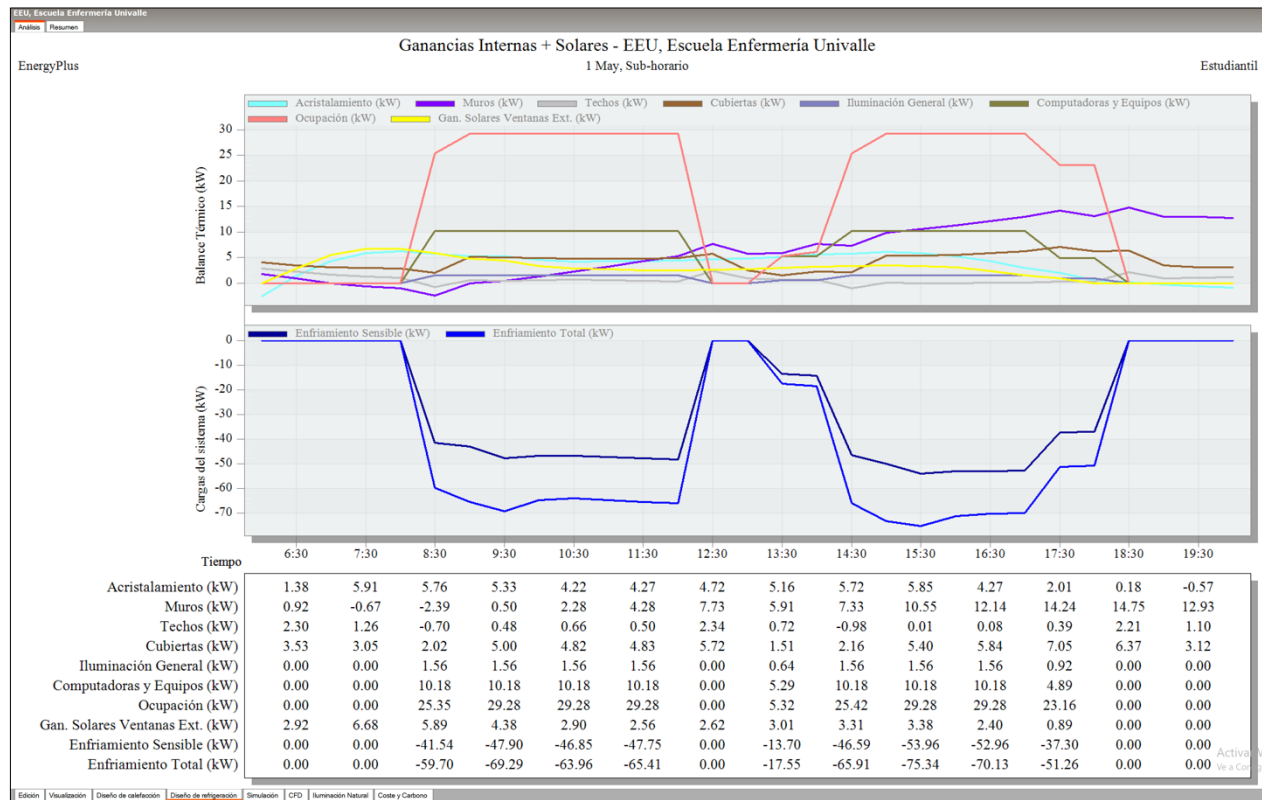
Apéndice VI. Simulación de cálculo de carga térmica para escenario mejorado con diseño pasivo



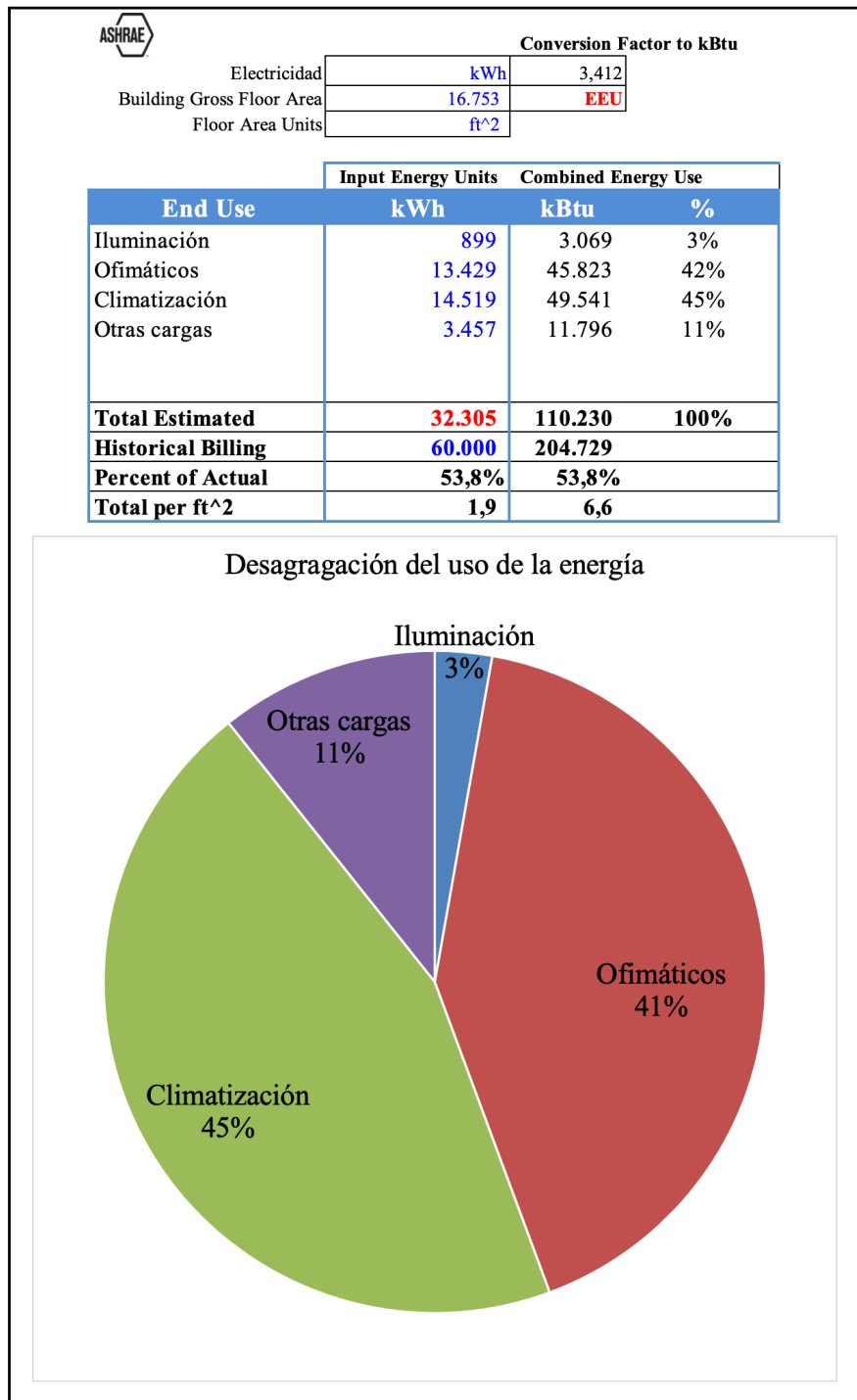
Apéndice VII. Formato ASHRAE “*Preliminary Energy-Use Analysis*”: Desagregación de uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) escenario mejorado con estrategias pasivas y Medidas de Eficiencia Energética (MEE)



Apéndice VIII. Simulación de cálculo de carga térmica para escenario mejorado con diseño pasivo más Medidas de Eficiencia Energética (MEE)



Apéndice IX. Formato ASHRAE “*Preliminary Energy-Use Analysis*”: Desagregación de uso de la energía en la Escuela de Enfermería Univalle (EEU) escenario mejorado con estrategias pasivas, Medidas de Eficiencia Energética (MEE) y energías renovables (paneles solares fotovoltaicos)



VITA DEL AUTOR

Ernesto Germán Porras Beltrán es Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad del Valle en 2008 con énfasis en Ciencias Térmicas y de Fluidos. Con más de 17 años de experiencia en climatización, ha liderado más de un centenar de diseños y estudios técnicos para edificaciones críticas, comerciales, industriales e institucionales..

Fue fundador y Director General de Klimaan Ingeniería Especializada S.A.S. (2011-2018), una empresa contratista especializada en diseño y montaje de sistemas de climatización. Desde 2018, es fundador y Consultor Principal de Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S., donde lidera proyectos en diseño técnico, auditorías energéticas, calidad de aire interior y comisionamiento, con un enfoque en sostenibilidad y eficiencia energética.

Entre sus proyectos más destacados fue Coordinador Regional para Cali del proyecto Distritos Térmicos Colombia Fase II, liderado por ONUDI (2020-2023), donde promovió soluciones de ingeniería sostenible, facilitó estudios de factibilidad y apoyó la identificación de zonas con potencial para distritos de enfriamiento. Participó como asesor en la elaboración de la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono, un proyecto clave para la sostenibilidad en edificaciones en Colombia, liderado por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible y el Ministerio de Ambiente.

Ha sido miembro activo de organizaciones gremiales como ASHRAE, donde fue Presidente del Capítulo Colombia (2019-2020), y ACAIRE, desempeñándose como miembro de la Junta de Dirección General y Vicepresidente del Capítulo de Calidad de Aire Interior (2018-2024). También ha contribuido en la creación de documentos técnicos como la Guía Referencia para Calidad del Aire Interior (CAI) y Prevención de Riesgos de Transmisión de SARS COV2 (COVID-19) y la propuesta de norma colombiana de climatización en ambientes hospitalarios.

En el ámbito académico, ha diseñado e impartido diplomados especializados como los de Calidad del Aire Interior en Ambientes Hospitalarios, Calidad de Aire Interior en Edificaciones y Commissioning, ofrecidos a través de ACAIRE y el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. Además, ha sido conferencista en eventos internacionales como Refriaméricas y ExpoACAIRE, compartiendo su experiencia en descarbonización, calidad del aire interior y almacenamiento de energía térmica, temas fundamentales para la sostenibilidad en la industria de la climatización.

Como autor, ha publicado trabajos como “Almacenamiento de Energía Térmica para Uso en Sistemas de Climatización” y es creador de contenido educativo para el canal de YouTube de Consultoría y Diseño en Climatización S.A.S. También escribe frecuentemente en revistas especializadas y en el blog de su compañía, abordando temas como calidad del aire interior, climatización en ambientes hospitalarios, commissioning, ventilación, almacenamiento de energía térmica, distritos térmicos y estrategias para la sostenibilidad y eficiencia energética en edificaciones.

Actualmente, su labor se centra en la consultoría técnica y la ingeniería aplicada, posicionándolo como un referente en el diseño de sistemas de climatización sostenibles y de alta eficiencia para edificaciones críticas y complejas. Se puede contactar a través de consultoria@ernestoporras.com.