



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA CUANTIFICACIÓN DE HUELLA DE
CARBONO DE LA ENERGÍA OPERACIONAL EN EDIFICIOS EXISTENTES.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RAMIRO ANTONIO HEVIA RIERA

PROFESOR GUÍA:

PAULA ARANEDA GUERRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

BARBARA RODRIGUEZ DROGUETT

FEDERICO DELFIN ARIZTIA

SANTIAGO DE CHILE

AÑO 2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil en Estructuras, Construcción
y Geotecnia
POR: Ramiro Antonio Hevia Riera
FECHA: 30/06/2014
PROFESOR GUÍA: Paula Araneda Guerra

PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA CUANTIFICACIÓN DE HUELLA DE CARBONO DE LA ENERGÍA OPERACIONAL EN EDIFICIOS EXISTENTES

En el presente trabajo de título se presenta una metodología para la evaluación energética y medición de la huella de carbono operacional de un edificio existente, tomando como caso de estudio las oficinas pertenecientes a la división Construcción, al interior del edificio de IDIEM ubicado en el campus de la FCFM.

Debido a que no existe un procedimiento para calcular huella de carbono de edificios en etapa de uso en Chile, la primera etapa de la investigación consiste en una revisión y comparación de las metodologías usadas comúnmente a nivel internacional. El resultado de esta etapa es la identificación de la metodología más adecuada, o adaptación de esta, para aplicar al caso de estudio.

La metodología propuesta está orientada a la identificación de oportunidades de reducción de emisiones de GEI mediante medidas de eficiencia energética. Además, plantea la utilización de un modelo energético calibrado del edificio como fuente de información de datos de consumo, con lo cual se pretende dar solución a los problemas de falta de información que normalmente se presenta en edificios existentes

Con la metodología definida se procede al cálculo de la huella de carbono de las oficinas de la división Construcción. De esta etapa se obtiene el total de gases efecto invernadero, expresados en toneladas equivalentes de CO₂, que las oficinas en estudio liberan al ambiente durante su operación.

La última etapa del trabajo corresponde a la elaboración de una guía de buenas prácticas para la medición de huella de carbono para edificios existentes. En el texto se resume los diversos aspectos y los resultados de la investigación realizada, que se estima puedan servir de guía para otros casos de estudio.

A ti Jime por haberme acompañado desde muy pequeño en esta etapa, sin tus consejos quizás la historia sería otra. Afortunadamente es esta, y afortunadamente cuento contigo.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi madre, por haberme entregado tanta ayuda a lo largo de la carrera y la vida. Gracias por haberme acompañado a lo largo de todos estos años, con un consejo, una caricia o un buen plato de comida. A través de tu preocupación y dedicación has hecho esta etapa más sencilla y feliz.

A mis hermanos Rorro, Jime y Carlos, contar con ustedes es como hacer trampa en la vida, es tener una ventaja única, en ustedes siempre encuentro lo que necesito. Tengo mucha suerte de ser su hermano menor, y estoy muy agradecido de ustedes y su apoyo. Gracias por estar conmigo en este proceso que ya acaba, y sé que estarán conmigo en cada nueva etapa que inicie.

A la Ale, mi polola, que le debo tanto tiempo que te robé hablando de la tesis y blablá... gracias por haber estado cada minuto conmigo, fuiste un apoyo incondicional y nunca dejaste que me viera sobrepasado. Gracias por cada palabra de aliento, por cada panorama que inventabas para distraernos, por cada juego con el que matamos tiempo.

A mis amigos que me acompañaron todos estos años, Maripoli, Tomás, Pelao, Jaime, Carlo y Rishie. Podría escribir un texto mucho más largo que esta memoria recordando cada buen momento que tuvimos estos seis, casi siete, años. Cada hora de estudio, de terraceo, de revolución (?) o lo que fuese, no hubiese sido lo mismo sin ustedes. También debo mencionar al negro y al fran, que a pesar de conocernos más tarde, hemos vivido momentos increíbles y lograron sacarme del sedentarismo extremo.

A mis amigos del colegio, a ellos que conozco hace tanto tiempo, que han vivido conmigo tantas etapas de mi vida y tengo la suerte de que estén presentes en esta también. Gracias por soportar mis ausencias en los primeros años de U y no haberme dejado en el olvido!!. A pesar de que tomamos caminos muy distintos, hemos sabido mantener la amistad y la buena onda.

A tanta gente que fue parte de estos años de universidad, a la Pili de difusión, por ayudarme en cada proyecto que participé y por hacerte tiempo cada vez que necesitaba de tus consejos. A Michael Reynolds, que de todos los profes que tuve en la U, fue lejos el más capo, a través de sus clases y conversaciones de patio o de bar aprendí más que en cualquier cátedra.

Para el final, aunque aún no lo pueda leer, quiero agradecer a la O!, que desde su llegada me ha entregado tantas alegrías y me ayuda a recordar lo fácil que es sonreírle a la vida.

Tabla de contenido

Capítulo 1.	Introducción	
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	General:	4
1.2.2	Específicos:.....	4
1.3	Metodología	4
1.3.1	Revisión de antecedentes.....	4
1.3.2	Definición de la metodología de evaluación de huella de carbono en edificios existentes	5
1.3.3	Aplicación de la metodología definida a un caso de estudio.....	5
1.3.4	Generación de una guía de buenas prácticas	5
Capítulo 2.	Revisión de antecedentes	
2.1	Revisión de contexto.....	6
2.2	Revisión técnica	21
2.2.1	Análisis de ciclo de vida.....	21
2.2.2	Análisis de ciclo de vida en la construcción.....	25
2.2.3	Enfoque de cálculo de la energía durante el ciclo de vida de un edificio.....	27
2.2.4	Huella de carbono	29
2.3	Revisión y discusión de aspectos claves de la metodología a definir.....	34
2.3.1	Límites del inventario.....	34
2.3.2	Recolección de datos	34
2.3.3	Cálculo de emisiones	37
2.3.4	Evaluación de incertidumbre.....	38
2.3.5	Estructura de la metodología a definir.....	40
Capítulo 3.	Definición de metodología propuesta	
3.1	Introducción	41
3.2	Objetivos y alcance	43
3.3	Unidades	43
3.4	Equivalente funcional	43
3.4.1	Vida de servicio	43
3.5	Límites del sistema	44
3.5.1	Límites geográficos de aplicación	45
3.5.2	Límites temporales	45
3.6	Recolección datos	45
3.7	Evaluación calidad de datos.....	47
3.8	Cálculo de emisiones de GEI.....	48
3.9	Evaluación de incertidumbre	48
3.10	Reporte de resultados.....	49
Capítulo 4.	Caso de estudio, medición huella de carbono edificio IDIEM	
4.1	Información general del caso de estudio.....	51
4.1.1	Propósito.....	51
4.1.2	Identificación del edificio.....	51
4.1.3	Antecedentes.....	52
4.1.4	Descripción del edificio.....	55

4.2	Desarrollo evaluación huella carbono.....	58
4.2.1	Objetivos y Alcance.....	58
4.2.2	Equivalente funcional.....	59
4.2.3	Límites del sistema.....	59
4.2.4	Recolección de datos.....	59
4.2.5	Evaluación de calidad de datos.....	60
4.2.6	Calculo de emisiones de GEI.....	61
4.2.7	Evaluación de incertidumbre.....	62
Capítulo 5.	Guía de buenas prácticas	
5.1	Normas.....	63
5.2	Definición de objetivos de la medición de huella de carbono.....	63
5.3	Definición del equivalente funcional.....	64
5.4	Límites del sistema.....	64
5.5	Recolección de datos.....	65
5.5.1	Obtención de datos mediante un modelo energético.....	66
5.6	Cálculo de huella.....	72
5.7	Evaluación calidad de datos e incertidumbre.....	73
5.8	Otras lecturas recomendadas.....	73
Capítulo 6.	Discusión y Conclusiones.....	74
Bibliografía	78
Anexo I.	Proceso de simulación y calibración del modelo	
I.1.	Generación del plan de simulación calibrada.....	81
I.2	Levantamiento de información.....	82
I.3	Creación del modelo inicial.....	82
I.4	Calibración del modelo.....	89
Anexo II.	Calibración desagregada de cada sistema instalado.....	98
Anexo III.	Inventario detallado de equipos instalados.....	102

Índice de tablas

Tabla 2-1: <i>Potenciales de reducción alcanzables en edificios de diversos usos, nuevos y existentes. Bajo distintas medidas de mejora. Fuente: IPCC WGIII AR5, 2013</i>	13
Tabla 2-2: <i>Análisis y revisión de normas y estándares de Huella de carbono de productos</i>	31
Tabla 2-3: <i>Comparación entre métodos de análisis de incertidumbre</i>	39
Tabla 2-4: <i>Estructura de la metodología a definir y documentos en los que se basa</i>	40
Tabla 3-1: <i>Índices de tolerancia de calibración</i>	46
Tabla 3-2: <i>Matriz pedigree para evaluación de datos</i>	49
Tabla 4-1: <i>Características de los equipos HVAC instalados</i>	56
Tabla 4-2: <i>Equivalente funcional</i>	59
Tabla 4-3: <i>Desglose de energía consumida</i>	60
Tabla 4-4: <i>Resumen de consumos</i>	60
Tabla 4-5: <i>Indicadores de calidad de datos para resultados de la simulación</i>	61
Tabla 4-6: <i>Consumos energéticos por categoría de uso</i>	61
Tabla 4-7: <i>Total de emisiones GEI edificio IDIEM en un año</i>	62
Tabla 4-8: <i>Total de emisiones GEI edificio IDIEM durante vida útil</i>	62
Tabla 5-1: <i>Índices de tolerancia para la calibración en diferentes estándares.</i>	71
Tabla I-1: <i>Índices de calibración según ASHRAE 14</i>	81
Tabla I-2: <i>Detalle de las zonas definidas en la modelación</i>	83
Tabla I-3: <i>Materialidad de los elementos constructivos</i>	84
Tabla I-4: <i>Detalle de ventanas</i>	84
Tabla I-5: <i>Cargas de iluminación</i>	85
Tabla I-6: <i>Cargas de computadores y equipos de oficina</i>	86
Tabla I-7: <i>Ocupación sin calibrar</i>	87
Tabla I-8: <i>Potencia de HVAC en cada zona</i>	88
Tabla I-9: <i>Índices de calibración obtenidos modelo inicial</i>	89
Tabla I-10: <i>Ocupación Calibrada</i>	90
Tabla I-11: <i>Potencia calibrada equipos instalados</i>	92
Tabla I-12: <i>Equipos de iluminación y potencia instalada en cada zona</i>	93
Tabla I-13: <i>Tolerancias de calibración</i>	96
Tabla II-1: <i>Tolerancias de calibración finales para cada sistema</i>	101
Tabla III-1: <i>Inventario de equipos registrados en visita a terreno</i>	102

Índice de figuras

<i>Figura 2-1:</i> Emisiones directas e indirectas (electricidad y producción de calor) en los distintos subsectores de las edificaciones (IEA, 2012a; JRC/PBL, 2012, Anexo II.8)	12
<i>Figura 2-2:</i> Emisiones regionales para Latinoamérica y el caribe, de carácter directo e indirecto (IEA, 2012a; JRC/PBL, 2012, Anexo II.8)	12
<i>Figura 2-3:</i> Resultados LCA aplicados a edificios de oficina, (T. Ramesh, 2010)	15
<i>Figura 2-4:</i> Relación entre energía operacional y energía total (Luis F.Cabeza, 2013)	16
<i>Figura 2-5:</i> Porcentajes de consumo de energía de uso final a nivel mundial. Fuente (IEA,2013)	16
<i>Figura 2-6:</i> Posibles etapas, inputs y outputs a considerar en un ACV (SAIC, 2006)	22
<i>Figura 2-7:</i> Etapas del ciclo de vida a considerar en enfoque B2B o B2C (Ihobe, 2009).....	22
<i>Figura 2-8:</i> Etapas Análisis Ciclo de Vida (ISO 14040)	23
<i>Figura 2-9:</i> Etapas de ciclo de vida de la construcción (EN15978:2012)	27
<i>Figura 2-10:</i> Correlación entre pasos de estándares HCP y ACV	33
<i>Figura 2-11:</i> Enfoques de calibración.....	36
<i>Figura 2-12:</i> Desglose pérdidas de energía.....	37
<i>Figura 3-1:</i> Marco normativo de la metodología en desarrollo	41
<i>Figura 3-2:</i> Correspondencia etapas de ACV y metodología propuesta.....	42
<i>Figura 3-3:</i> Etapa del ciclo de vida a evaluar.....	44
<i>Figura 4-1:</i> Planta primer piso Edificio IDIEM y zona en estudio.....	52
<i>Figura 4-2:</i> Datos de consumo obtenidos de remarcadores	53
<i>Figura 4-3:</i> Remarcadores de consumo eléctrico.....	54
<i>Figura 4-4:</i> Planta de la zona en estudio	56
<i>Figura 4-5:</i> Corte de la zona en estudio	56
<i>Figura 4-6:</i> Planta de equipos de iluminación	57
<i>Figura 4-7:</i> Planta de equipos de HVAC	57
<i>Figura 4-8:</i> Esquema de ubicación de árboles al exterior de edificio	58
<i>Figura 4-9:</i> Consumos mensuales de energía a utilizar en el cálculo de emisiones GEI.....	60
<i>Figura 6-1:</i> Porcentajes de participación de emisiones de GEI por categoría y uso final de la energía para el caso de estudio	76
<i>Figura I-1:</i> Modelo en DesignBuilder de las oficinas a evaluar	82
<i>Figura I-2:</i> Zonificación realizada en el caso de estudio	82
<i>Figura I-3:</i> Materialidad muro estructural edificio IDIEM	83
<i>Figura I-4:</i> Materialidad tabique divisor en las oficinas en estudio.....	84
<i>Figura I-5:</i> Horarios de Iluminación según inventario	86
<i>Figura I-6:</i> Unidad FanCoil tipo (Obtenida de www.construmatica.com)	87
<i>Figura I-7:</i> Esquema FanCoil DesignBuilder (Obtenida www.designbuilder.co.uk).....	87
<i>Figura I-8:</i> Resultados simulación no calibrada	89
<i>Figura I-9:</i> Horario calibrado de ocupación zonas de recepción	91
<i>Figura I-10:</i> Horario calibrado de ocupación zonas de plantas de oficina	91
<i>Figura I-11:</i> Horario calibrado de ocupación oficinas privadas	92
<i>Figura I-12:</i> Horario calibrado utilización iluminación recepción	93
<i>Figura I-13:</i> Horario calibrado utilización iluminación para plantas de oficinas	94
<i>Figura I-14:</i> Horario calibrado utilización iluminación para oficinas privadas.....	94
<i>Figura I-15:</i> Resultados de cada etapa de calibración para consumo total de electricidad.....	96
<i>Figura I-16:</i> Tolerancias de calibración obtenidas en cada etapa de calibración	96

<i>Figura II-1: Resultados de calibración para los equipos de oficina.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura II-2: Variación tolerancias calibración en cada simulación para los equipos de oficina...98</i>	<i>98</i>
<i>Figura II-3: Resultados de calibración para sistema de iluminación</i>	<i>99</i>
<i>Figura II-4: Variación tolerancias calibración en cada simulación para sistema de iluminación</i>	<i>99</i>
<i>Figura II-5: Resultados de calibración para sistema de HVAC</i>	<i>100</i>
<i>Figura II-6: Variación tolerancias calibración en cada simulación para sistema de HVAC</i>	<i>100</i>

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

El objetivo principal de este trabajo de memoria, consiste en la elaboración de una propuesta metodológica para la medición de huella de carbono de la energía operacional de edificios existentes que permita la identificación de medidas de reducción de emisiones. El presente estudio, pretende ser un aporte más en la disputa en contra el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, GEI, y su impacto en el cambio climático.

Según cifras del Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, las emisiones mundiales de GEI causadas por actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. El mismo organismo sostiene que las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial deben reducirse hasta un 85% por debajo de los niveles del año 2000 para el 2050 con el fin de limitar el aumento de la temperatura global media a no más de 2 grados Celsius por encima de los niveles pre-industriales.

Chile ha asumido el desafío de reducir sus emisiones de GEI y consumos energéticos para el año 2020. Es así que, el año 2012, se firma el compromiso de reducir en un 20% la emisiones de CO₂ y en un 12% el consumo energético, con respecto a las proyecciones realizadas para el 2020. Por otro lado, Chile ha oficializado su ingreso a la OCDE, lo que condiciona a realizar una serie de mejoras en temas ambientales, incluyendo mayor desarrollo de medidas de eficiencia energética y una mejor gestión de los GEI. Una de las primeras medidas para poder cumplir dichos compromisos, es identificar que sectores son los más intensivos en términos de emisiones y en uso de energía. En este sentido, la información disponible demuestra que las edificaciones representan uno de los sectores más relevantes y en dónde se pueden encontrar grandes potenciales de mejora.

Según en el IPCC, en el año 2010 los edificios fueron responsables del consumo de un 32% de la energía de uso final a nivel global, también, se les atribuye un 30% de las emisiones de GEI relacionadas al consumo energético y un 19% de las emisiones GEI a nivel global. A nivel nacional, según cifras oficiales, el sector comercial, público y residencial ligado a edificaciones consume, considerando sólo la fase de operación, un 26% de la de energía del País (BNE, 2010) y es responsable del 33% de las emisiones de GEI (MMA 2012) y de un 34% (CONAMA 2010) de la generación de residuos sólidos a nivel nacional.

Si es que no se toman medidas, se estima, según el IPCC, que a mediados del presente siglo el uso de energía y las emisiones de GEI relacionadas se dupliquen, o hasta, se tripliquen. Sin embargo, existe la posibilidad de que la demanda de energía se mantenga constante e incluso, se reduzca en comparación a los niveles actuales. Esta posibilidad se sostiene en la aplicación masiva de buenas prácticas costo-efectivas y tecnologías de eficiencia energética.

En este sentido, a nivel nacional, se han generado planes y estrategias tendientes a la introducción de un perfil de eficiencia energética en los edificios que permite el cumplimiento de los compromisos establecidos. De igual manera, se ha desarrollado una Estrategia Nacional de Construcción Sustentable. Uno de los objetivos específicos de dicha estrategia es disminuir las emisiones contaminantes producidas durante la operación de las edificaciones e infraestructura. Con el fin de lograr ese objetivo, es determinante identificar y contabilizar las emisiones de GEI relacionadas a un edificio para establecer medidas efectivas de reducción de los consumos, la herramienta adecuada para esta tarea corresponde a la Huella de Carbono (HC)

La huella de carbono corresponde al indicador resultante de la medición de los GEI emitidos por un individuo, organización, evento o producto, ya sea de manera directa o indirecta. La cantidad total de emisiones se expresa en CO₂ equivalente. La evaluación de la huella de carbono evalúa el impacto de calentamiento global relacionado a las emisiones que fueron cuantificadas.

Si bien se cuenta con la herramienta, es necesario que el proceso se estandarice para así asegurar una medición consistente a nivel sectorial. En Chile, para el caso de las edificaciones, no existe ninguna estandarización en la medición de huella de carbono. Es esta ausencia la que se trata de suplir en este trabajo, mediante la propuesta de una metodología de medición de huella de carbono de la energía operacional en edificios existentes. El enfoque son los edificios de actividad comercial (oficinas), sin desmedro de que bajo nuevas consideraciones, pueda ser actualizada para su aplicación en edificios con otra utilización. Se ha decidido considerar la etapa operacional debido a que es ahí donde se produce aproximadamente un 80% del consumo energético de todo el ciclo de vida de la edificación. Además de ser una herramienta de medición de emisiones, la metodología propuesta pretende facilitar la identificación de medidas costo-efectivas de reducción de huella de carbono.

La metodología propuesta se basa en las normas de análisis de ciclo de vida y huella de carbono de productos, ISO14044:2006 e ISO14067:2013 respectivamente. También se basa en las normas europeas específicas para edificios EN15978:2012 y EN15804:2012. Se toman, además, en consideración los estándares PAS2050 y el GHG Protocol for Products. Una característica propia de esta metodología es que plantea una técnica mixta de obtención de datos de consumo del edificio, complementando la información medida en el sitio con los datos obtenidos mediante una simulación energética en un software. El objetivo principal de este proceso es completar los vacíos de información que eventualmente se puedan presentar en un estudio de este tipo.

A modo de validación, una vez definida la metodología se aplica a un caso de estudio. Para esto se ha elegido las oficinas de la división Construcción del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructura y Materiales, IDIEM, ubicado en las dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, FCFM, de la Universidad de Chile. Para estas oficinas, se cuenta con los consumos registrados durante el período Agosto- Diciembre del 2012, los cuales se obtuvieron mediante remarcadores de consumo energético.

Para concluir este trabajo, se realiza una guía de buenas prácticas para la aplicación de la metodología desarrollada, en dónde se resumen las lecciones aprendidas que resultan de la investigación realizada para definir una metodología práctica con base empírica.

El documento se estructura en 7 capítulos, más un capítulo de anexos:

Capítulo 1. Introducción: Descripción de la motivación, problemática y de la solución prevista y la manera en que esta es llevada a cabo.

Capítulo 2. Revisión de antecedentes: Presentación de la motivación y contexto de la investigación. Se dan respuesta a las preguntas claves que definen este trabajo. Además, se revisan normativas, estándares y metodologías actuales para huella de carbono de productos. Además se realiza un análisis de estudios de ciclo de vida realizados a edificios

Capítulo 3. Definición de metodología propuesta: Presentación de la metodología propuesta en este trabajo.

Capítulo 4. Caso de estudio, medición huella de carbono edificio IDIEM: Resultados del análisis de los consumos energéticos medidos en el edificio, los cuales son utilizados para calibrar el modelo energético computacional

Capítulo 5. Guía de buenas prácticas: Síntesis de lo aprendido a lo largo de la investigación y entrega de guías para la correcta medición de huella de carbono utilizando la metodología propuesta

Capítulo 6. Discusión y Conclusiones: Presentación de las conclusiones que se desprenden del trabajo realizado, y se proponen consideraciones para completar lo realizado

Bibliografía: Consiste en la lista de documentos y referencias que fueron utilizados para este trabajo

Anexo I. Proceso de simulación y calibración del modelo: Se detalla el proceso de simulación para obtención de datos.

Anexo II. Calibración desagregada para cada sistema instalado: Resultados de calibración para cada consumo final de energía

Anexo III Inventario detallado de equipos instalados

1.2 Objetivos

A continuación se exponen los objetivos del estudio que se aborda en el presente trabajo

1.2.1 General:

Desarrollar una metodología de estimación cuantitativa de la huella de carbono, en la etapa operacional, de edificios existentes considerando el uso final de la energía, que permita definir medidas costo-efectivas para la reducción de las emisiones asociadas.

1.2.2 Específicos:

- Analizar el contexto actual, a nivel nacional, sobre la medición de huella de carbono e identificar aquellos compromisos y estrategias existentes para la reducción del nivel del nivel de emisiones GEI.
- Analizar y comparar metodologías internacionales de medición de huella de carbono y estudios empíricos de análisis de ciclo de vida a edificios existentes para la medición de huella de carbono.
- Medir la huella de carbono, a nivel operacional, de oficinas pertenecientes a la división Construcción del edificio IDIEM de la Universidad de Chile.
- Comparar y calibrar datos relativos al consumo de energía obtenidos mediante una simulación energética del edificio en estudio.
- Generar una guía de buenas prácticas para la medición de huella de carbono en edificios existentes en Chile

1.3 Metodología

El desarrollo metodológico de este trabajo se ha dividido en cuatro etapas

1.3.1 Revisión de antecedentes.

Durante esta etapa se realizan las siguientes revisiones

- i) **Revisión de Contexto:** Se evalúa la situación actual, a nivel nacional e internacional, en cuanto a medición de huella de carbono y su importancia. También se identifican políticas incentivadas en el país que justifiquen la realización de esta investigación. Luego, se realiza un análisis de la importancia de los edificios en términos de emisiones de GEI y se justifica el enfoque de este trabajo. Para esta revisión se investigan los proyectos desarrollados por distintos ministerios del Estado de Chile, reportes internacionales tales

como los realizados por el IPCC, estudios empíricos de análisis de ciclo de vida a edificios a nivel internacional entre otros.

- ii) **Revisión técnica:** Se revisan documentos normativos y estándares internacionales de huella de carbono tales como el grupo de normas *ISO 14040:2006* referentes al Análisis del ciclo de vida e *ISO14067:2013 Huella de Carbono de Productos*. Se analizan también las normas europeas *EN 15804:2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto* y *EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios* relacionados con el análisis ciclo de vida en la construcción. Entre los estándares se destacan el *GHG Protocol* para productos y el estándar *PAS 2050:2011*.
- iii) **Revisión y discusión de aspectos de la metodología a definir:** Se justifican los aspectos más importantes de la metodología de evaluación mediante las normas ya mencionadas y estudios pertinentes a cada tema.

1.3.2 Definición de la metodología de evaluación de huella de carbono en edificios existentes

Se define la metodología propuesta en este trabajo, la cual se fundamenta en la revisión y discusión realizada anteriormente.

1.3.3 Aplicación de la metodología definida a un caso de estudio

En esta etapa se aplica la metodología definida para evaluar la huella de carbono asociada a las oficinas pertenecientes a la división Construcción del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Materiales, IDIEM. Para esto, se realizan los siguientes pasos claves

- i) **Auditoría energética:** Se recolecta información de consumos energéticos al interior del edificio durante el año 2012 utilizando remarcadores de consumo eléctrico.
- ii) **Levantamiento de información:** Mediante visitas al edificio se realiza un levantamiento de los equipos instalados de iluminación, equipos de oficina y HVAC. En conjunto se realizan encuestas para conocer los patrones de uso del edificio
- iii) **Modelamiento energético:** Se genera un modelo energético del edificio el cual es calibrado con la información de consumo registrada.
- iv) **Cálculo de huella de carbono:** Con los resultados de consumo obtenidos se calcula la huella de carbono de las oficina en estudio.

1.3.4 Generación de una guía de buenas prácticas

La última etapa del trabajo corresponde a la generación de una guía práctica para la aplicación de la metodología desarrollada para la medición de huella de carbono en edificios existentes. En este documento se recopilan todos los aprendizajes, lecciones y conclusiones de la investigación.

Capítulo 2. Revisión de antecedentes

Este capítulo está constituido por 3 secciones. En la primera de ellas se plantean las preguntas que mediante sus respuestas justifican la realización de esta investigación, esta sección corresponde a lo que se ha llamado Revisión de contexto. La segunda parte es una base técnica, en dónde se revisan definiciones, normativas, estándares y procedimientos de análisis a utilizar en el presente trabajo. Por último, la tercera sección donde se dan los argumentos para justificar las decisiones a tomar sobre la metodología en desarrollo.

2.1 Revisión de contexto

¿Qué se entiende por huella ambiental?

De un tiempo a esta parte, el cambio climático causado por las actividades antropogénicas se ha vuelto tema recurrente a nivel global. La mitigación y reversión de sus efectos es tema a tratar en las estrategias de desarrollo de los países, investigaciones científicas e incluso en los grupos empresariales. Uno de los principales desafíos, es establecer herramientas de medición de las cargas ambientales asociadas a las actividades humanas. Resultado de esto ha sido la generación de diferentes herramientas, entre ellas, una de las más destacadas corresponde al concepto de Huella ambiental.

La huella ambiental engloba todos los potenciales impactos ambientales de un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de Vida. El enfoque de cálculo para su obtención es denominado “Análisis de ciclo de vida” identificando y cuantificando tanto el uso de materiales y energía como las emisiones al entorno, para determinar el impacto de ese uso de recursos y esas emisiones y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. Los impactos son analizados para diversas categorías de impacto, no todos los estándares mencionan la mismas categorías, a continuación se muestran las definidas en el documento de la Scientific Applications International Corporation (SAIC, 2006)

- Calentamiento global
- Reducción del Ozono estratosférico
- Acidificación
- Eutrofización
- Formación de ozono fotoquímico
- Toxicidad terrestre
- Toxicidad acuática
- Salud humana
- Consumo de materias primas
- Uso de suelos
- Uso de agua

¿Qué razones hay para considerar solamente el impacto de calentamiento global?

El impacto de calentamiento global, es sólo uno de todos los que componen una huella ambiental. Este impacto es consecuencia de los gases de efecto invernadero, GEI, emitidos al ambiente. La herramienta utilizada en su evaluación se llama Huella de Carbono, HC, y se define como la medición de todos los GEI emitidos por un individuo, organización, evento o producto, ya sea de manera directa o indirecta. La cantidad total de emisiones se expresa en CO₂ equivalente

Se acepta actualmente considerar solo el impacto de calentamiento global teniendo en cuenta la importancia que está cobrando este tema para la supervivencia del planeta. El Cambio climático y sus efectos es una de las principales preocupaciones a nivel global y los científicos han identificado que el calentamiento global registrado está directamente relacionado con las emisiones de GEI y su constante crecimiento en las últimas décadas.

Según cifras del Intergovernmental Panel on Climate Change [38];**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, IPCC, Las emisiones mundiales de GEI causadas por actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. El mismo organismo sostiene que las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial deben reducirse hasta un 85% por debajo de los niveles del año 2000 para el 2050 con el fin de limitar el aumento de la temperatura global media a 2 grados Celsius por encima de los niveles pre-industriales.

El objetivo de contabilizar y reducir las emisiones de GEI ha sido planteado a distintas escalas. A nivel internacional, el acuerdo más importante que se ha desarrollado es el protocolo de Kyoto. También se pueden observar esfuerzo a nivel de empresas, las normas ISO, el GHG Protocol [29];**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, PAS 2050 [49]son algunos de las normativas y estándares desarrollados en esta área. Incluso se puede observar que a nivel de individuos existe interés por conocer su propia HC, ejemplo de ello es la proliferación de herramientas para este fin en internet.

A nivel nacional se observa que hablar de desarrollo limpio, se traduce a la reducción de emisiones de GEI. Prueba de esto es analizar los proyectos del Ministerio del Medio Ambiente. Más adelante en esta sección se realiza una revisión de los proyectos más destacados en Chile, entre los que se cuentan los acuerdos ambientales asociados con el ingreso a la OCDE y los compromisos asumidos en materia de emisión de GEI y de consumo de energía para el año 2020.

Por otro lado, las empresas que a la fecha han transparentado la carga ambiental de sus productos también se han enfocado solamente en cuanto a kgCO₂.eq, es decir, mediante la huella de carbono. Ejemplo de iniciativas como esta son las empresas Gerdau-Aza de aceros, Empresas COPEC y la minera Collahuasi entre otras. A nivel institucional, el Ministerio del Medio Ambiente en Chile fue la primera organización gubernamental en medir las emisiones asociadas a su operación a lo largo de todo el país.

Se puede observar entonces, que si bien la HC no es una herramienta holística de evaluación ambiental, la importancia que ha tomado el Calentamiento global para las personas, organizaciones y países ha hecho de las emisiones de gases de efecto invernadero uno de los principales problemas medioambientales a resolver en la actualidad.

¿Qué compromisos, estrategias y proyectos existen en Chile que incentiven la medición de huella de carbono?

Es una tendencia a nivel global que los países estén tomando conciencia sobre el Cambio climático y que quieran reducir sus emisiones. Chile también está en línea con esta tendencia y en los últimos años ha generado estrategias y programas en pos de reducir la carga ambiental de las actividades desarrolladas al interior del territorio. El desarrollo de dichas estrategias se ha visto impulsado por dos compromisos ambiental de gran envergadura, establecidos durante el gobierno de Sebastián de Piñera, los cuales corresponden a:

- ✓ **Reducción emisiones CO₂.** Con fecha 23 de agosto del 2010, nuestro país comunicó oficialmente a la secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático CMNUCC, que se implementarán acciones efectivas de mitigación de modo de lograr una reducción de 20% con respecto a su trayectoria creciente de emisiones “business-as-usual” en el 2020, proyectadas desde el 2007. En la misma declaración se explicó que las medidas de eficiencia energética, energías renovables y medidas de uso de suelo, serán el foco principal de las acciones nacionalmente apropiadas de mitigación de Chile¹
- ✓ **Reducción de consumo energético:** La estrategia Nacional de Energía establece la elaboración de un Plan de Acción de Eficiencia Energética (PAEE20) cuya meta es alcanzar un 12% de reducción de la demanda energética proyectada para el año 2020. Las medidas del PAEE20 buscarán incorporar elementos de eficiencia energética en los distintos sectores productivos, tales como la industria, minería transporte, como también en artefactos y artículos de consumo². *“En el sector edificación, incluyendo vivienda social, se buscará mejorar la calidad energética de la envolvente en edificaciones construidas sin criterios de Eficiencia Energética (EE), realizar su diseño con altos estándares de EE, llevar a cabo la oferta de productos y servicios de construcción con criterios de eficiencia, etc”*³

Durante el año 2010 Chile aceptó la invitación a ser parte de la OCDE, invitación que fue lograda luego de un proceso de varios años. En el contexto de la primera evaluación de desempeño ambiental de Chile realizada voluntariamente en el marco del proceso de acceso a la OCDE (2005), surgieron 52 recomendaciones formuladas por un equipo de expertos de la organización, cuyo objetivo fue profundizar un conjunto de materias relativas a la promoción del desarrollo sustentable y gestión del medio ambiente. Entre las recomendaciones, existen 2 que se pueden asociar directamente a la eficiencia energética y medición y reducción de emisiones de GEI.

¹Estrategia Nacional de Construcción Sustentable 2013-2020. p7

² Estrategia Nacional de construcción sustentable 2012-2020. p8

³ MINENERGIA (2012) Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2030.p17

- Recomendación 10: Desarrollar medidas de eficiencia energética para todos los aspectos del consumo de energía.
- Recomendación 51: desarrollar una estrategia programada y equilibrada en relación con los temas de cambio climático; fortalecer las políticas de eficiencia en el uso de la energía y de mitigación de los gases de efecto invernadero, incluidas las combinaciones de energías más limpias, y la promoción del uso de mecanismos de desarrollo limpios en el contexto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y el Protocolo de Kyoto

A la fecha, ya se han iniciado una serie de proyectos y estrategias con el objetivo de cumplir los compromisos firmados por Chile. A continuación se presentan algunos de los más destacados

Estrategia Nacional de Construcción Sustentable

El 1 de agosto de 2012 se firmó un convenio marco de colaboración entre el Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Energía y Ministerio del Medio Ambiente con el objetivo general de coordinar, promover, difundir y fomentar la construcción sustentable en el país. Para la coordinación de las acciones y asegurar el cumplimiento de los objetivos y metas estipuladas en dicho convenio, se creó en la División Técnica de Estudio y Fomento habitacional del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, la Secretaría Ejecutiva de Construcción Sustentable, que será el organismo responsable de alinear a los cuatro ministerios y a los actores interesados, en el avance y consecución de objetivos (MINVU, 2012).

Uno de las primeras acciones de este convenio colaborativo entre los 4 ministerios fue la definición de una Estrategia Nacional de Construcción Sustentable [45] **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la herramienta establece los lineamientos para integrar el concepto de desarrollo sustentable en el área de la construcción y pretende ser útil en el posicionamiento de país a nivel regional al 2020. *“Entre los ejes definidos, la incorporación de la sustentabilidad en la edificación y el entorno, ocupa un lugar fundamental. Así también, generar innovación, emprendimiento, educación y difusión de buenos hábitos tanto en la industria como en la población”*⁴

Los resultados esperados con la aplicación de la estrategia son:

1. Edificaciones e infraestructura con consideraciones de sustentabilidad al año 2020
2. Aportar, desde los sectores comercial, público y residencial, (CPR) al compromiso de reducción del 12% del consumo energético proyectado al 2020

⁴ Minvu, www.csustentable.cl , Estrategia Nacional de Construcción Sustentable

3. Aportar, desde el sector de la construcción, a la reducción del 20% de gases efecto invernadero, tomando como base las emisiones proyectadas al año 2020.
4. Aportar, desde el sector de la construcción, a que un 10% de la energía generada sea por fuentes renovables no convencionales al año 2024

Otras herramientas generadas mediante este convenio son el Código de Construcción sustentable y la Calificación Energética de viviendas.

Proyectos LECB-Chile y MAPS-Chile

Además de los proyectos específicos para el sector de la construcción, en Chile desde el año 2012 se han impulsado 2 grandes proyectos de crecimiento y desarrollo bajo en emisiones y mitigación del cambio climático. A continuación se presenta una breve descripción

1. Programa de fomento de capacidades para el desarrollo bajo en emisiones de carbono para Chile (LECBS por su nombre en inglés): Está liderado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Sus objetivos son
 - ✓ Actualización del inventario nacional de gases de efecto invernadero y la creación de un sistema nacional de inventario de estos gases.
 - ✓ Implementación del programa nacional de gestión del carbono.
 - ✓ Sistema de medición, reporte y verificación (MRV) para acciones nacionales de mitigación apropiadas en los sectores público y privado.
 - ✓ Diseño de una estrategia nacional de desarrollo bajo en emisiones (LEDS) que incorpore los resultados de los tres primeros componentes.
2. Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático (MAPS, por su nombre en inglés): Lanzado en marzo de 2012, su base fundamental es la interacción entre el desarrollo de investigación especializada y un proceso participativo multi-actor conformado por individuos de diversos sectores y con experiencia en cambio climático, en un proceso facilitado profesionalmente. Esta combinación de elementos permitirá identificar de manera asertiva planes de acción y escenarios de mitigación del cambio climático en Chile.

Acuerdo de Producción Limpia

Un acuerdo de producción limpia, APL, es un "*convenio celebrado entre un sector empresarial, empresas y los organismos públicos con competencia en las materias del Acuerdo, cuyo objetivo es aplicar producción limpia a través de metas y acciones específicas*"⁵. El objetivo general de los APL es servir como un instrumento de gestión que permite mejorar las condiciones productivas, ambientales, de higiene y seguridad laboral, de eficiencia energética, de eficiencia en el uso del agua, y otras materias abordadas por el Acuerdo, de las empresas de un determinado

⁵ NCh.2797.Of2003. Acuerdos de Producción Limpia (APL)- Especificaciones

sector productivo que lo suscriben, buscando generar sinergia y economías de escala en el logro de los objetivos acordados. De igual forma, busca aumentar la eficiencia productiva y mejorar la competitividad. Los sectores comprometidos son:

- Agropecuario
- Industria Manufacturera
- Construcción
- Minería
- Pesca
- Hoteles y Restaurantes
- Servicios Públicos
- Territoriales
- Establecimientos Educativos

En particular, con el sector de los Establecimientos Educativos se ha denominado "Campus Sustentable" y tiene como objetivo final que las universidades que se suscriban a él desarrollen en su interior una política de sustentabilidad a nivel de docencia, investigación y extensión. En términos más puntuales, se han planteado metas en reducción de agua y energía, un manejo integral de los residuos sólidos, seguridad y salud ocupacional y la reducción de la huella de carbono corporativa

Son más de 20 las casas de estudio que se adhirieron a esta iniciativa, implementada contar de marzo del 2013. Entre las cuales se encuentra la Universidad de Chile.

El Acuerdo define una serie de metas que deben cumplir los suscriptores, entre la cuales, se quiere destacar la siguiente: *“El 100% de las instituciones de educación superior adheridas medirán su huella de carbono corporativa”*.

¿Cuáles son los motivos para realizar una medición de huella de carbono de la energía en edificios?

Según en el IPCC, en el año 2010 los edificios fueron responsables del consumo de un 32% de la energía de uso final a nivel global, también, se les atribuye un 30% de las emisiones de GEI relacionadas al consumo energético y un 19% de las emisiones GEI a nivel global. A nivel nacional, según cifras oficiales, el sector comercial, público y residencial ligado a edificaciones consume, considerando sólo la fase de operación, un 26% de la de energía del País (BNE, 2010) y es responsable del 33% de las emisiones de GEI (MMA 2012) y de un 34% (CONAMA 2010) de la generación de residuos sólidos a nivel nacional.

Se estima que a mediados del siglo XXI el uso de energía y las emisiones de GEI relacionadas se dupliquen, o incluso se tripliquen. Una de las principales razones para este aumento es el aumento del acceso de billones de personas en países desarrollados a un mejor

acondicionamiento de sus viviendas. Otras razones importantes son el constante aumento de la población, la migración hacia las ciudades, el aumento de la riqueza y mejor calidad de vida.

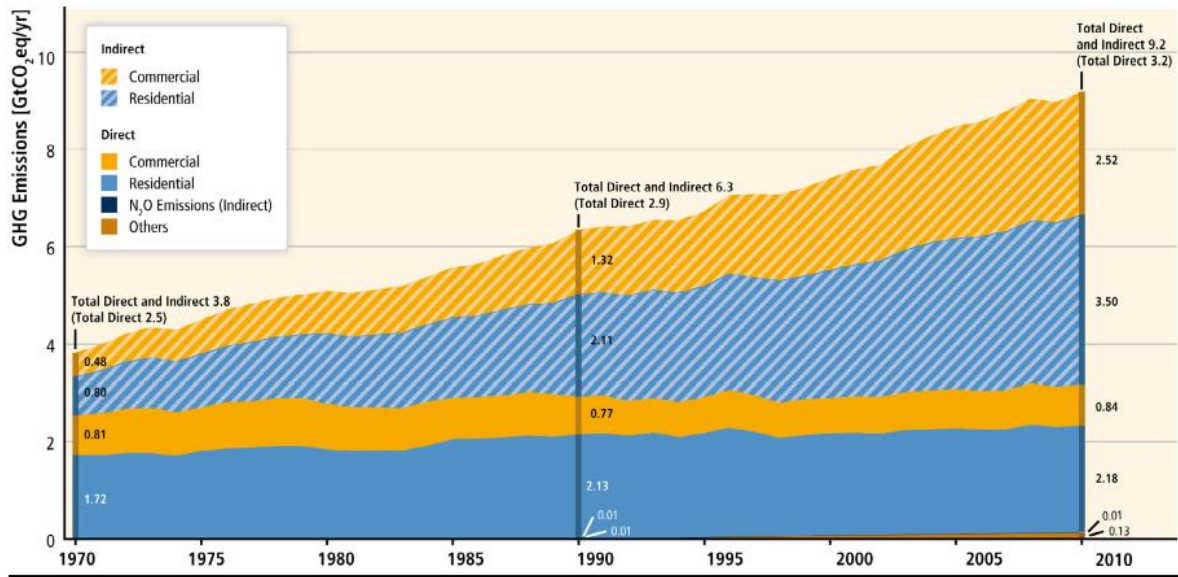


Figura 2-1: Emisiones directas e indirectas (electricidad y producción de calor) en los distintos subsectores de las edificaciones (IEA, 2012a; JRC/PBL, 2012, Anexo II.8)

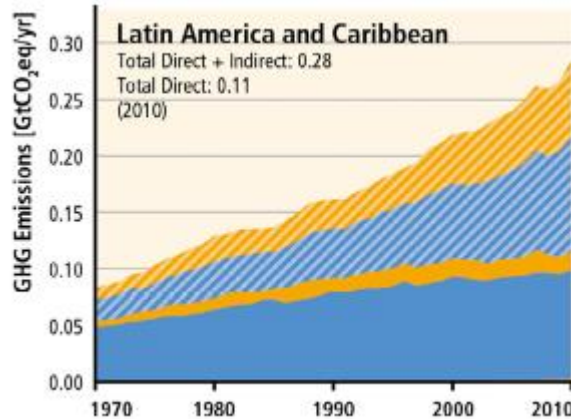


Figura 2-2: Emisiones regionales para Latinoamérica y el Caribe, de carácter directo e indirecto (IEA, 2012a; JRC/PBL, 2012, Anexo II.8)

Por otro lado, existe la posibilidad de que el uso de energía se mantenga constante e incluso, se reduzca en comparación a los niveles actuales. Esta posibilidad se sostiene en la aplicación masiva de buenas prácticas costo-efectivas y tecnológicas de eficiencia energética. Las tecnologías energéticamente eficientes en electrodomésticos, iluminación, equipos, tecnologías e información (TIC) pueden reducir substancialmente el crecimiento esperado en el consumo energético debido al aumento en cantidad y uso de estos equipos. A continuación se presenta una

tabla con los potenciales de reducción alcanzables en diversos edificios, tanto nuevos como existentes

Tabla 2-1

Potenciales de reducción alcanzables en edificios de diversos usos, nuevos y existentes. Bajo distintas medidas de mejora. Fuente: IPCC WGIII AR5, 2013[38]

Uso final	Generación de energía gratis en el sitio	Eficiencia del artefacto	Eficiencias del sistema	Cambios de utilización
Calefacción	20%–95%	30%– 80%	90%	10%–30%
Agua Caliente	50%–100%	60%–75%	40%	50%
Refrigeración	50%–80%	50%–75%	67%	50%–67%
Cocina	0–30%	25–75%–80%		50%
Iluminación	10–30%	75%; 83%–90%; 99.83%	80%–93%	70%
Refrigeradores		40%		30%; 50%
Lavajillas		17+%		75%
Lavadoras		30%		60%–85%
Secadoras de ropa		50+%		10%–15%–100%
Computadores de oficina y monitores		40%		
Cargas de electricidad general	10%–120%			

Se observa entonces que a través de una reducción del consumo de energía ligado al sector de las edificaciones se puede ayudar de manera significativa al cumplimiento del compromiso de reducción de energía en 12% para el 2020.

¿Por qué concentrarse en edificios existentes?

De un tiempo a esta parte, la industria de la construcción ha tomado en consideración el problema ambiental relacionado a su actividad. Es así como se han generado una serie de estrategias de construcción limpia y reducción de emisiones de GEI. Ejemplo de esto son los múltiples estándares y códigos energéticos que se han desarrollado a nivel global tales como Leadership in Energy & Environmental Design, LEED, del US Green Building Council, PassivHouse de Alemania o el código Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology, BREEAM, que un principio se aplicaba en el Reino Unido pero a partir del 2009 extendió su uso a nivel internacional.

Primeramente, es preciso distinguir que tanto la medición de huella de carbono como la identificación medidas de eficiencia energética representan procesos muy distintos si se realizan en un edificio nuevo o en uno existente. En el primer caso, la evaluación se hace en la etapa de

diseño, lo cual se traduce en mayor flexibilidad al establecer las características del edificio en pos de lograr el comportamiento energético deseado. Por otro lado, cuando se trabaja en acondicionamiento de edificios existentes las características que pueden modificarse son más acotadas si es que no se quieren incurrir en gastos de inversión muy elevados. Además, es necesario establecer, en este último caso, una línea base del comportamiento actual del edificio para conocer su comportamiento e identificar potenciales de mejora. Estas diferencias hacen que una metodología pensada para edificios nuevos no sea adecuado para el caso de edificios existentes y por lo tanto, las metodologías y estándares deben ser específicas para cada caso.

El foco de la discusión sobre estrategias de reducción de emisiones en edificios se ha centrado en nuevas construcciones relegando a un segundo lugar las construcciones ya existentes. El estado del arte de las prácticas relativas al mejoramiento del comportamiento energético en construcciones nuevas se encuentra bastante avanzando e incluso en la actualidad se puede llegar a construir edificios altamente optimizados, tales como los denominados *Net Zero energy buildings (NZBEs)* los cuales se proveen con sus propios sistemas de generación energéticos. Por otro lado el trabajo realizado en construcciones existentes se encuentra más atrasado, lo cual, representa un campo promisorio de mejoras dadas las grandes cantidades de emisiones que se podrían reducir.

El IPCC, en el capítulo Buildings, del documento Working Group III- Mitigation of climate change, correspondiente al IPCC 5th Assesment Report[38], establece que en edificios comerciales, los ahorros en Calefacción, Ventilación, y Aire Acondicionado (HVAC, por su nombre en inglés) pueden alcanzar niveles desde 25 al 50% modificando los equipos y los sistemas de control solamente. Si además se realizan cambios en la envolvente del edificio y se incorporan elementos pasivos estos ahorros serían significativamente mayores. En cuanto a la iluminación, se pueden lograr ahorros, de acuerdo a esta misma fuente, de un 30% hasta un 60%. Por último, en el documento se afirma que a través del reacondicionamiento de mayor envergadura se puede llegar a lograr niveles de ahorro desde 50% hasta un 90%

En Chile ya se han realizados proyectos para reacondicionamiento de edificios existentes con el fin de llevarlos a estándares más eficientes de consumo energético. Uno de los proyectos más destacados corresponde al programa de Eficiencia Energética en Edificios Públicos (PEEEP) a cargo de la Agencia Chilena de Eficiencia energética, AChEE el programa busca hacer más eficientes los edificios públicos, utilizando tecnologías y buenas prácticas en iluminación, calefacción, automatización, entre otras (AChEE, 2012).

Se considera entonces que debido a su alto potencial de mejora energética y disminución de emisiones de GEI, las políticas y programas para el reacondicionamiento de edificios se debiesen impulsar, a nivel nacional, en forma preferente y el presente trabajo pretende ser un aporte en ese sentido.

¿Por qué considerar sólo la etapa de operación del edificio?

No es intención del autor asegurar que solamente es necesario considerar la fase de operación de un edificio para tener una apropiada medición de huella de carbono. Pero se pretende enfocar la investigación sólo en medir los aspectos del problema energético del edificio para poder estudiar cabalmente y poder identificar y proponer solución a las problemáticas de la etapa considerada.

Para entender la importancia relativa de cada una de las etapas del ciclo de vida se realiza una revisión de estudios empíricos que utilizan el Análisis de ciclo de vida de la energía como metodología de cálculo. Uno de los estudios más contundentes y que compila una serie de resultados en otras publicaciones es el realizado por Ramesh et al, “Life Cycle Energy Analysis of Building: An Overview”[56], en dónde el autor recopila diversos análisis de ciclo de vida a diversos edificios alrededor del mundo.

En dicho estudio se revisaron 26 casos de estudio de edificios de oficinas a nivel mundial. Se obtuvieron los siguientes resultados de medición de energía operacional e incorporada



Figura 2-3: Resultados LCA aplicados a edificios de oficina, (T. Ramesh, 2010)
*El número en el eje horizontal corresponde al número del caso estudio

Otro resultado importante se encuentra en el estudio de Luis F. Cabeza et al. [42] realizado a 60 edificios residenciales y no-residenciales pertenecientes a 9 países distintos. A partir de sus

resultados se ha obtenido la siguiente relación, *Figura 2-4*, entre la energía operacional y la energía total por año

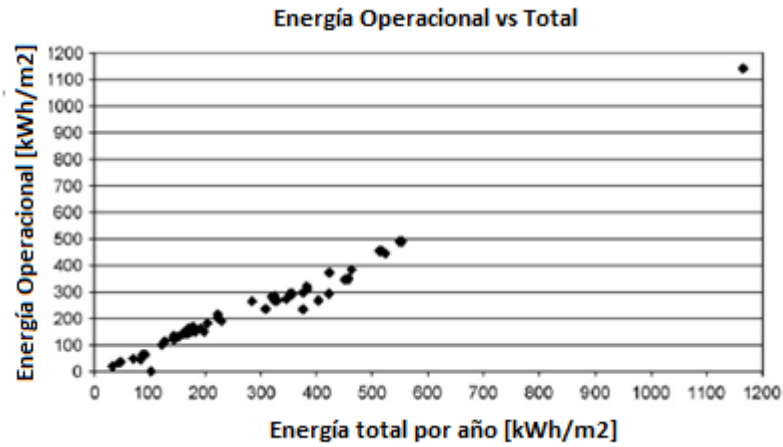


Figura 2-4: Relación entre energía operacional y energía total (Luis F.Cabeza, 2013)

En donde se aprecia una relación lineal entre la energía operacional y la energía total por año (normalizada por año y por m²)

Otro interesante análisis resulta al descomponer la energía operacional entre los distintos sistemas instalados en el edificio. Los resultados se muestran en los gráficos a continuación

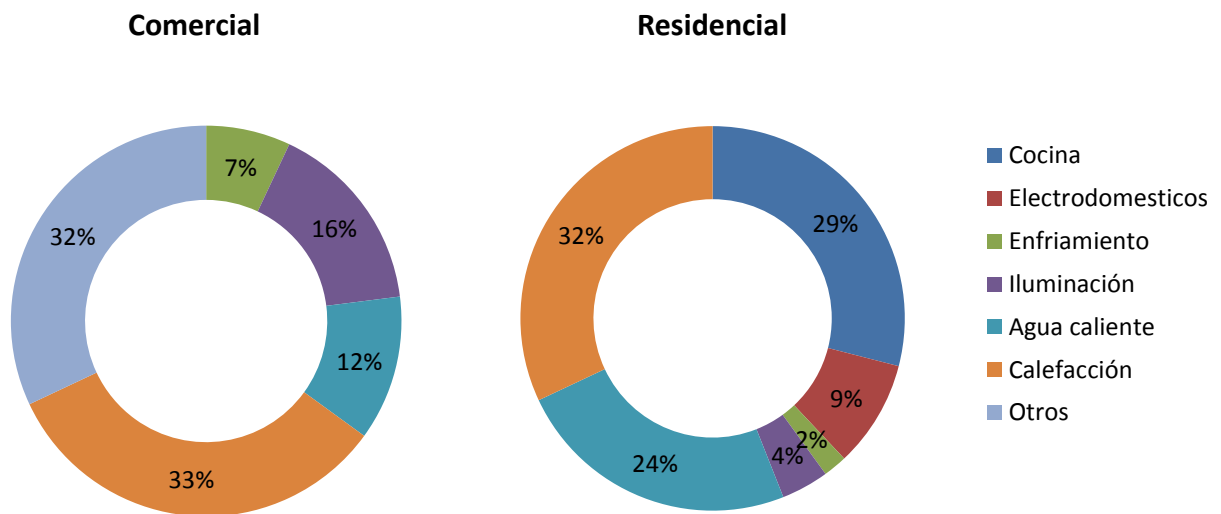


Figura 2-5: Porcentajes de consumo de energía de uso final a nivel mundial. Fuente (IEA,2013)

Del total de los estudios revisados, se pueden obtener las siguientes conclusiones con respecto al peso de cada etapa del ciclo de vida

1) Etapa de construcción:

i) Extracción de materiales y producción de materiales de construcción

Según las estadísticas de los estudios revisados, entre un 10% a un 20% del total de energía durante la vida útil del edificio se consume en esta etapa por lo tanto existe un llamativo potencial de reducción de emisiones que se podría explotar al utilizar materiales menos intensivos energéticamente y más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, este tipo de decisiones se toman a nivel de pre diseño y diseño, por lo tanto cuando se realiza la medición de huella de carbono a edificios existentes no representa ningún potencial de reducción.

ii) Transporte de materiales y construcción del edificio

Según los estudios analizados estos procesos tienen una participación cercana al 1% del total de energía consumida a lo largo del ciclo de vida de todo el edificio por lo tanto no tiene potencial de mejoramiento que signifique grandes reducciones tanto en el consumo energético como en emisiones de GEI a lo largo de todo el ciclo de vida. Por otro lado en edificios existentes esta etapa ya fue realizada y no presenta ninguna opción de mejora, por lo tanto se cree que no es de relevante su cálculo e inclusión en el reporte.

2) Etapa de operación

i) Energía de operación

Los estudios revisados muestran que entre un 80 a un 90% de la energía total consumida a lo largo de todo el ciclo de vida se debe a la fase de operación del edificio. Es por lo tanto en esta etapa donde se encuentran los mayores potenciales de reducción de consumo y por ende de emisiones.

La información acerca de los consumos energéticos se puede realizar tanto a nivel de *energía de usuario final* como de *energía primaria* siendo esta última la más recomendada de calcular y reportar debido a que incluye los porcentajes de pérdida que se producen en la generación y distribución de la electricidad consumida.

Dentro los distintos sistemas instalados, los relacionados a HVAC son los más intensivos energéticamente. Otros importantes resultan ser los de Agua Caliente Sanitaria e Iluminación.

ii) Mantenimiento y renovación

Si bien esta etapa representa un potencial de mejora en edificios existentes, en nuestro país existe muy poco o nula información acerca de la huella de carbono de los productos utilizados en la construcción. La empresa Gerdau ha sido pionera a nivel local y ha calculado y reportado sus emisiones, por otro lado, la industria del hormigón recién se encuentra en proceso de medición. Al no existir datos locales sobre la huella de carbono relacionada a los productos de construcción disminuye la utilidad de hacer el cálculo en esta etapa ya que solo se contarían con datos extranjeros, lo cual aumenta el error y la incertidumbre de los cálculos.

3) Etapa de fin de vida útil

i. Demolición, transporte y disposición

Los estudios muestran que esta etapa representa aproximadamente el 1% de todo el consumo energético, por lo tanto no tiene un gran potencial de reducción de emisiones con el respecto al total de emisiones a lo largo de todo el ciclo de vida

Los resultados aquí resumidos justifican, a opinión del autor, la consideración de la huella de carbono sólo de la energía operacional del edificio. Ya que se puede observar su gran importancia relativa con respecto a la otras y existe la información a nivel nacional para lograr resultados confiables.

¿Por qué es importante una estandarización del proceso?

A nivel global existen más de 400 etiquetas ambientales⁶ y sólo para el caso de emisiones GEI, considerando las más importantes, existen alrededor de 80 iniciativas y métodos. Este fenómeno, permite que surjan las siguientes preguntas ¿Cómo puedo probar que el producto u organización es “verde”, bajo que enfoque? Si es que se elige un enfoque ¿Este será aceptado por todos? y por último, ¿Hay que demostrar que el producto es verde en manera diferente para diferentes clientes? Estas preguntas son planteadas en el desarrollo del Programa piloto de huella ambiental de la Unión Europea.

⁶ El etiquetado ambiental presenta información cuantificada ambiental del ciclo de vida de un producto para poder compararlo con otros que cumplan la misma función

En la Unión Europea (UE) existe un avanzado desarrollo en tema de medición y comunicación de huella de carbono, o más general, huella ambiental de productos. Los diferentes países que la componen ya se han percatado de los problemas que genera tener distintas metodologías, estándares e iniciativas para informar sobre las características ambientales de los productos. En una encuesta realizada a los consumidores en la UE se identifica que la falta de consistencia es una de las principales barreras para comunicar el comportamiento ambiental (72,5% de los encuestados)⁷.

Para dar solución a esta problemática, en la UE se ha impulsado el ya mencionado Programa Piloto de Huella ambiental, del cual, se quiere destacar los siguientes objetivos:

- Nivelar el campo para una competición basada en el comportamiento ambiental, fundamentada en una herramienta común de medición del comportamiento.
- Desarrollar un herramienta confiable, reproducible y comparable para proveer información ambiental

Se observa entonces que a nivel internacional, se ha comenzado un proceso de unificación de las herramientas de medición para lograr consistencia en las mediciones y credibilidad por parte de los consumidores o usuarios. Esta misma preocupación debería estar presente cuando se diseñen estrategias a nivel nacional.

Como se mencionó anteriormente, Chile está desarrollando una estrategia nacional de Construcción sustentable. En el documento de presentación de dicha estrategia se menciona la importancia de *“contar con estándares definidos de planificación, diseño, construcción y operación sustentable”*, desde la problemática abordada en el presente trabajo, se considera que además es importante contar con estándares definidos para la evaluación de la condición actual de los edificios existentes, lo que permitiría hacer una evaluación, primero, de las actuales emisiones de GEI y segundo, de un adecuado plan de acción para un mejoramiento del comportamiento ambiental del edificio.

A modo de resumen, para los efectos de la problemática en estudio, se considera que sería válido considerar la experiencia de la UE y las medidas que se está tomando en cuánto a estandarización de la comunicación ambiental de los productos y aplicar esta experiencia a las nuevas estrategias que se están desarrollando en Chile. Y de esa experiencia se deriva la necesidad de contar con una metodología estándar para la medición de huella de carbono en edificios, la cual debe cumplir con ser una herramienta confiable, reproducible y comparable para proveer información ambiental.

⁷ Encuesta "Attitudes of Europeans towards Building the Single Market for Green Products", Eurobarometer

Para la evaluación de huella de carbono en edificios, ¿Qué enfoque es pertinente utilizar?

En la actualidad, existen dos enfoques principales a la hora de realizar una medición de huella de carbono. Por un lado se encuentra el *enfoque corporativo*, que mide todas las emisiones de GEI relacionadas con una determinada organización, mientras que por otro lado, existe el *enfoque de producto*, en dónde se analizan todas las emisiones de GEI durante el Ciclo de Vida del producto o servicio analizado.

Debido a las diferencias que existen entre ambos enfoques, es necesario definir de manera clara cual se va a utilizar. En cuanto a los edificios, la tendencia a nivel internacional es considerarlos como un producto, y por lo tanto utilizar ese enfoque. Puede resultar algo difícil, en un comienzo, entender un edificio completo como un producto, debido a algunas características especiales que son propias. Un primer acercamiento es que al asimilar el ciclo de vida de un edificio con el de un producto se observa que a modo general, poseen las mismas 4 etapas principales; obtención de materiales, producción/construcción, uso, y etapa de desecho.

Sin embargo, en este caso se estima que, hay una razón más importante para analizar los edificios como un producto y es que este enfoque considera un análisis de ciclo de vida, lo cual es muy importante para los efectos de la evaluación de un edificio ya por esta vía se interpreta el objeto en evaluación como un sistema y lo que implica darle un carácter holístico a este análisis. Y es justamente ese tipo de análisis el que se debe realizar en un edificio debido a la fuerte interacción entre todas las etapas de su ciclo de vida.

Cuando se diseña un edificio, las decisiones tomadas en las primeras etapas del ciclo de vida, tienen directa repercusión en las etapas posteriores. Por ejemplo, la decisión de utilizar aislación térmica no sólo tiene importancia en la fase de construcción, sino que influye fuertemente en la etapa de operación y también en la etapa de demolición y disposición

Finalmente, como productos, los edificios tienen una serie de características que los convierten en especiales; tienen una prolongada vida útil, sufren de múltiples cambios y transformaciones, tienen distintos usos, intervienen muchos componentes y materiales distintos, las técnicas constructivas dependen de las características locales, los límites del sistema son complejos de fijar, etc (Ignacio Zabalza Bribián, 2009)

¿En cuál de los tipos y categorías de edificio se enfoca el estudio?

Existen diversas maneras de clasificar los edificios, ya sea por tipo de construcción, materialidad, tamaño, propietario, uso etc. Para fines de este estudio, la categorización por uso y propiedad es la más adecuada.

La clasificación por propiedad se refiere a quién es el propietario de la edificación, existen dos opciones:

- i) Edificio público: Es el caso en que pertenece a una organización pública.
- ii) Edificio privado: Es el caso en que el propietario es un persona jurídica o natural.

En la clasificación por uso existen dos categorías generales; edificios residenciales y no-residenciales. Los primeros están asociados a personas individuales o familias mientras que los segundos a una organización. Además, se puede establecer una sub-categoría para los edificios no residenciales, identificando los edificios en los cuales se genera un servicio y en cuales un bien, dependiendo de la organización a cargo.

- Edificios de organizaciones que generan servicios: Es el caso de edificios gubernamentales, educacionales, oficinas de consultoría, etc.
- Edificios de organizaciones que generan bienes: Edificios industriales como maestranzas, fábricas, etc.
- Edificios de organizaciones mixtas: Edificios en los cuales se generan tanto bienes como servicios

Utilizando esta categorización, se define el enfoque de la metodología para edificio público o privado, no-residenciales para organizaciones que generan servicios o de carácter mixto

La razón de enfocarse en un solo tipo de edificios es por lo complejo y extenso que resultaría abarcar por ejemplo, edificios no-residenciales y residenciales, ya que poseen características propias muy diferentes. Se espera que este trabajo se complete a futuro con otro tipo de edificios

2.2 Revisión técnica

2.2.1 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta metodológica para evaluar los potenciales impactos a la salud humana y medioambiente de productos, procesos y sistemas a lo largo de todo su ciclo de vida.

El ciclo de vida considera todas las etapas del producto, es decir desde la cuna (extracción de materias primas) hasta las tumba (fin de vida) incluyendo todas las etapas intermedias como transporte, manufactura, distribución, uso, etc.

Para la realización de un ACV se debe entender a cabalidad el sistema que se evalúa ya que es necesario recopilar y analizar todas las entradas (inputs) y salidas (outputs) asociados a las distintas etapas del ciclo de vida.

El ACV posee la característica de ser una herramienta holística, es decir, se basa en asumir que diferentes partes de un sistema están interrelacionadas entre sí y por ende solo se puede lograr entenderlo completamente si se integran todos los aspectos que participan. Un ACV permite la estimación de los impactos ambientales acumulados generados en las distintas etapas del ciclo de vida del producto, logrando así la incorporación de impactos que no suelen ser considerados en otros tipos de evaluación.

A continuación se presenta un cuadro con las posibles etapas a considerar para un producto y los inputs y outputs relacionados

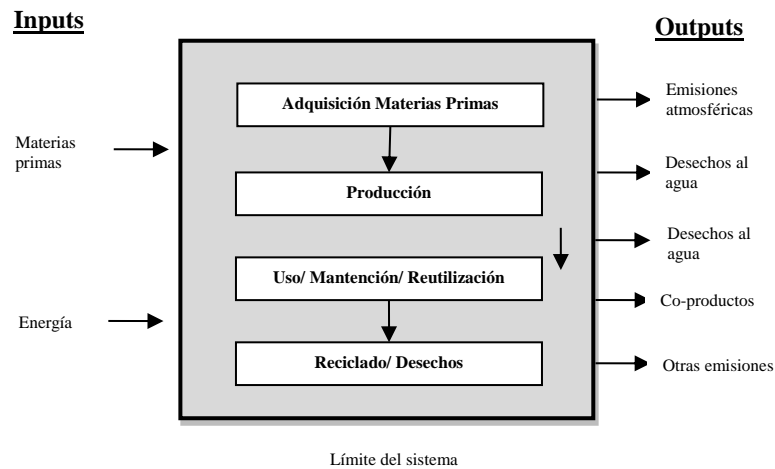


Figura 2-6: Posibles etapas, inputs y outputs a considerar en un ACV (SAIC, 2006)

El enfoque de ACV depende del tipo de usuario final de la información. Se puede realizar un ACV Business-to-Business B2B o Business-to-Consumers B2C, dependiendo del enfoque, se determinan que etapas del ciclo de vida se deben considerar. Normalmente B2B considera las etapas llamadas desde la cuna a la puerta o también desde la puerta a la puerta. Por otro lado el enfoque B2C considera las etapas desde la cuna a la tumba o también desde la cuna a la cuna en el caso de que exista reciclaje



Figura 2-7: Etapas del ciclo de vida a considerar en enfoque B2B o B2C (Ihobe, 2009)

La principal barrera en la implementación de este tipo de análisis es su elevado costo en tiempo y dinero, ya que se necesita grandes cantidades de información a recopilar. Una de las mayores complejidades en el proceso de recopilación de datos se debe al hecho de que al evaluar todo el ciclo de vida se necesita información de todas las organizaciones y procesos que intervienen en cada una de las etapas.

En marco metodológico del ACV ha sido estandarizado por International Standards Organization ISO en el grupo de normas ISO 14040:2006 *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia*[11] e ISO 14044:2006 *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices*[12]. En éstas se definen 4 etapas para el desarrollo del ACV, las cuales se presentan en la *Figura 2-8*.

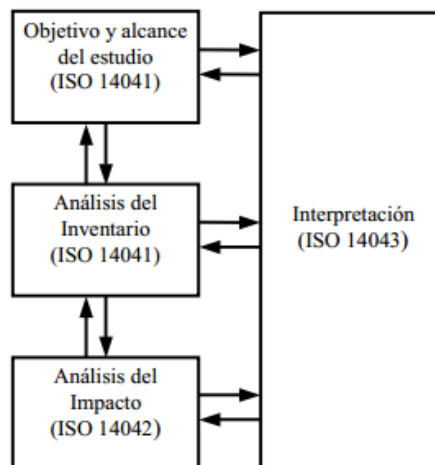


Figura 2-8: Etapas Análisis Ciclo de Vida (ISO 14040)

2.1.1.1 Definición de alcance y objetivos

La etapa de definición de alcance y objetivos corresponde al proceso que define el propósito de realizar un ACV y el método a utilizar para la inclusión de los impactos del ciclo de vida en la toma de decisiones.

Durante esta etapa se deben tomar decisiones acerca del tipo de información necesaria que se debe utilizar para que el proceso sea útil en la toma de decisiones, además, se debe establecer el rango de precisión que se necesita lograr en los resultados y por último, definir la manera en que estos últimos son comunicados e interpretados.

En esta fase del estudio se establece la unidad funcional la cual describe la función principal del sistema evaluado.

Debido a su naturaleza holística un ACV completo puede resultar muy extenso. Es por esto que se deben identificar muy bien los límites del sistema procurando que cumplan con los objetivos

de la evaluación. Dentro de las variables que determinan los límites del sistema se pueden identificar la aplicación prevista del estudio, las hipótesis planteadas, los criterios de exclusión, los datos y limitaciones económicas y el destinatario previsto (Antón, 2004)

2.1.1.2 Inventario de ciclo de vida (ICV)

El inventario de ciclo de vida, ICV consiste en efectuar la cuantificación de requerimientos de energía y materias primas y de las emisiones a la atmósfera, emisiones al agua, desechos sólidos y otros tipos de emisiones durante el ciclo de vida completo de un producto, proceso o actividad.

El resultado de un ICV es una lista que contiene la cantidad de poluciones emitidas al ambiente y la cantidad de energía y materiales consumidos con relación al producto, proceso o actividad. Los resultados pueden ser separados por etapas del ciclo de vida, por tipo de emisión, o por una combinación de ambos.

2.1.1.3 Evaluación de impactos de ciclo de vida (EICV)

En esta etapa se evalúan los potenciales impactos a la salud humana y al medioambiente relacionados con el consumo de recursos y emisiones identificadas durante el ACV. El objetivo de esta etapa corresponde a establecer las relaciones entre un proceso o producto y sus potenciales impactos ambientales (SAIC, 2006).

La importancia de este análisis radica en que una correcta evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida permite comparaciones más robustas y un mejor entendimiento de los efectos asociados al proceso o producto.

Una diferencia importante entre los diferentes métodos de evaluación de impactos reside en la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental, endpoint, o bien, considerar los efectos intermedios, midpoints. Las categorías de impacto ambiental intermedias se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo, en general, modelos de cálculo que se ajustan mejor a dicha intervención. Éstas proporcionan una información más detallada sobre de qué manera y en qué punto se afecta al medio ambiente. Las categorías de impacto finales son variables que afectan directamente a la sociedad, por tanto su elección resultaría más relevante y comprensible a escala global. Sin embargo, la metodología para llegar a cuantificar el efecto último no está plenamente elaborada, no existe el suficiente consenso científico necesario para recomendar su uso. Por todo ello, actualmente, es más común recurrir a categorías de impacto intermedia. (Antón, 2004)

De acuerdo a UNE-EN-ISO 14042, la evaluación de impactos de ciclo de vida consta de varias etapas, de las cuales algunas son obligatorias y otras opcionales. A continuación se describen las 3 obligatorios

- i) **Seleccionar y definir categorías de impacto:** El primer paso corresponde a determinar las categorías de impacto que se consideran en el estudio. Las categorías de impacto más utilizadas corresponden a Calentamiento global, Reducción del Ozono estratosférico, Acidificación, Eutrofización, Formación de ozono fotoquímico, Toxicidad terrestre, Toxicidad acuática, Salud humana, Consumo de materias primas, Uso de suelos, Uso de agua
- ii) **Clasificación:** En esta fase se organiza la información procedente del ICV. La organización se realiza asignando los datos del ICV a la categoría de impacto correspondiente. Si una sustancia contribuye a varias categorías de impacto, tiene que ser tenida en cuenta en todas estas categorías.
- iii) **Caracterización:** Se realiza una comparación de cada sustancia ya clasificada con la sustancia de referencia de cada categoría. Dicha comparación se realiza mediante los factores de caracterización.

Cada una de las categorías de impacto posee una unidad de referencia y todas las sustancias de dicha categoría deben expresarse a través de esa unidad de referencia, la transformación se realiza mediante el factor de caracterización. Por ejemplo, para el caso de calentamiento global la unidad de referencia corresponde a kg-equivalentes de CO₂ y el factor de caracterización es el Potencial de calentamiento global (PCG)

2.1.1.4 Interpretación del ciclo de vida

La interpretación del ciclo de vida (ICV) es el último paso de un ACV y se puede definir como un sistema técnico que permite identificar, cuantificar, revisar, evaluar y comunicar efectivamente la información proveniente del ICV y EICV. Los resultados provenientes de dicha interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto que puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de datos se podrá determinar cuál presenta un mejor comportamiento ambiental.

2.2.2 Análisis de ciclo de vida en la construcción

Existe una interdependencia entre las distintas etapas del ciclo de vida de un edificio, por ejemplo, si se invierte menos en la etapa de construcción utilizando materiales con baja capacidad de aislación térmica se tendrá que invertir más en la etapa de uso debido a mayores cargas de ventilación y/o calefacción. Un análisis ACV puede ser utilizado como una herramienta más para optimizar el comportamiento a la hora de diseñar un edificio.

Existen diversas aplicaciones de un ACV en la industria de la construcción, entre las que se puede destacar el uso para la selección de los materiales y elementos de construcción, procesos constructivos o una evaluación completa del edificio.

ACV se ha usado en la construcción desde 1990 y hasta la fecha se han desarrollado diversas herramientas para evaluaciones ambientales con el enfoque ciclo de vida, las cuales se pueden clasificar en 3 niveles (Oscar Ortiz, 2009)

- **Nivel 1:** Herramientas de comparación de productos. Gabi (GER), SimaPro(NL), TEAM (Fra), LCAit (SE), National RenewableEnergyLaboratory' s (NREL)U.S.Life-CycleInven- tory(LCI)Database
- **Nivel 2:** Herramientas de apoyo para decisiones de diseños de todo el edificio. LISA (Aus), Ecoquantum (NL), Envest 2 (UK)
- **Nivel 3:** Marco de trabajo o sistemas para la evaluación completa de edificios. BREEAM (UK), LEED (USA), SEDA (Aus).

En Europa se han desarrollado una serie de proyectos que trabajan con ACV en la construcción. En la mayoría de ellos el objetivo era adaptar la metodología de un ACV al sector de la construcción y desarrollar herramientas amigables para los evaluadores. Algunos ejemplos de estos proyectos son, REGENER, Annex 31 IEA, PRESCO, IMPRO-Building, ENSLIC Building y LoRe-LCA.

A la fecha se han desarrollado una serie de softwares que facilitan el proceso de evaluación. En conjunto con estos softwares se utilizan bases de datos las cuales representan condiciones específicas al tipo de país y su ubicación. Las bases de datos más desarrolladas actualmente representan condiciones de países industrializados. La información para países en vías de desarrollo aún es escasa.

Como se mencionó anteriormente, la ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 son las normas de estandarización del ACV para productos y servicios, sin embargo, en Europa se han generado estándares específicos para el sector de la construcción, los cuales son desarrollados por el organismo europeo de normalización CEN TC 350. Los estándares EN 15804:2012 *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto*[15] y EN 15978:2012 *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo*[16] proveen reglas generales de cálculo para realizar un ACV en productos de construcciones y construcciones.

El CEN TC 350 propone el siguiente ciclo de vida de una construcción, el cual se desarrolla bajo un principio de modularidad

Ciclo de Vida del Edificio EN 15978

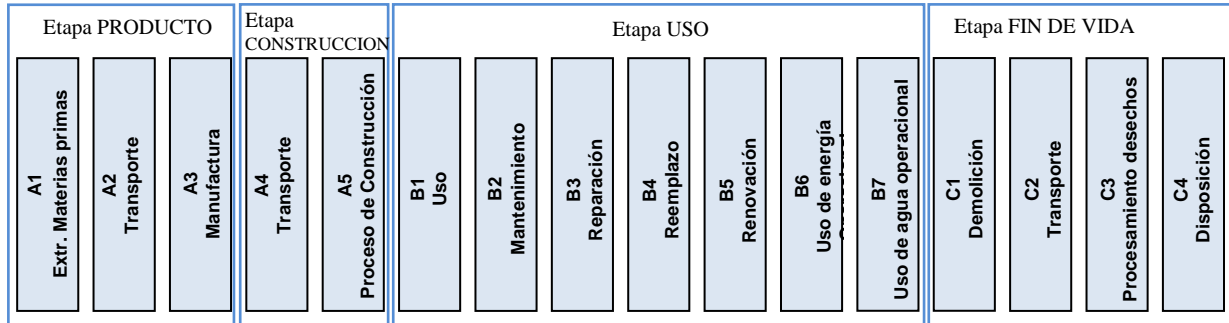


Figura 2-9: Etapas de ciclo de vida de la construcción (EN15978:2012)

De todos los inputs que intervienen en el desarrollo de un proyecto de construcción, uno de los más relevantes corresponde a la energía consumida en cada una de las etapas del ciclo de vida, este hecho se traduce en que las emisiones relacionadas con la energía ocupan un elevado porcentaje de participación entre todas las emisiones. Es debido a esto que se ha desarrollado un enfoque particular del ACV, denominado Análisis de Ciclo de Vida de la Energía que considera solamente los inputs y outputs relacionados con el consumo energético del edificio. A continuación se detallan las principales características.

2.2.3 Enfoque de cálculo de la energía durante el ciclo de vida de un edificio

Para la medición de la energía a lo largo de todas las etapas de un edificio se utiliza el enfoque denominado *Análisis de ciclo de vida de la energía, ACVE*, el cual contabiliza todos los inputs y outputs de energía a lo largo de todo el ciclo de vida de la edificación. Es posible relacionar cada una de las etapas del ciclo de vida con una categoría de energía correspondiente. Dichas categorías de energía se describen a continuación

- **Energía incorporada (Embodied Energy):** Energía incluida en los materiales para la construcción, mantención y renovación del edificio. Existen dos tipos:

Energía incorporada inicial

$$EE_i = \sum m_i * M_i + E_c \quad \text{Ec. 1.1}$$

EEi = Energía incorporada inicial (Embodied Energy),
mi = Cantidad del material de construcción
Mi = energía contenida en el material
E_c = Energía requerida en el proceso constructivo

Energía incorporada recurrente: Materiales para la renovación y mantenimiento

$$EE_r = \sum m_i M_i \left[\left(\frac{L_b}{L_{mi}} \right) - 1 \right] \quad \text{Ec. 1.2}$$

EE_r = Energía incorporada recurrente

L_b = Vida útil del edificio

L_{mi} = Tiempo de vida del material i

- **Energía operacional (Operational Energy):** Corresponde a la energía utilizada para la operación de los sistemas de HVAC, iluminación, suministro de agua fría y caliente, aparatos eléctricos entre otros. La energía operacional en el tiempo de vida del edificio es expresada

$$OE = E_{OA} L_b \quad \text{Ec. 1.3}$$

OE = Energía operacional (Operational Energy)

E_{OA} = Energía operacional anual

E_{OA} = Energía operacional anual

L_b = Vida útil del edificio

- **Energía de demolición (Demolition Energy):** Corresponde a la energía utilizada para el proceso de demolición del edificio además de la utilizada para el transporte de los desechos

$$DE = E_D + E_T \quad \text{Ec. 1.4}$$

DE = Energía demolición (Demolition Energy)

E_D = Energía para la demolición

E_T = Energía usada para el transporte de materiales de desecho

Luego, la energía a considerar para ACVE se obtiene de la suma de todas las energías recién descritas. Se tiene entonces

$$ECV = EE_i + EE_r + OE + DE \quad \text{Ec. 1.5}$$

2.2.4 Huella de carbono

2.2.4.1 Definición huella de carbono

La atmósfera tiene la capacidad de absorber parte de la radiación infrarroja emitida a la tierra a través del espacio produciendo un aumento de la temperatura en el planeta. Este efecto natural llamado *Efecto Invernadero* se ha visto potenciado en los últimos siglos debido a las actividades humanas, en particular a la emisión de ciertos gases que contribuyen con este efecto aumentado así la temperatura de la tierra. Las posibles consecuencias del aumento de temperatura debido al efecto invernadero corresponden al derretimiento de las capas de hielo polar y glaciares, lo que implica un aumento en los niveles del mar. Además, un aumento de temperatura puede ocasionar cambios climáticos regionales de efectos aun inciertos.

La huella de carbono (HC) corresponde a la medición de todos los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por un individuo, organización, evento o producto, ya sea de manera directa o indirecta. La cantidad total de emisiones se expresa en CO₂ equivalente. La evaluación de la huella de carbono es una versión simplificada de un ACV ya que en vez de considerar una serie de impactos solo se concentra en el impacto de *calentamiento global*.

La sustancia de referencia para la huella de carbono es el CO₂ y su unidad de medida es kg CO₂-equivalente. Para establecer la comparación de cada sustancia perteneciente a esta categoría con la unidad de referencia se utiliza el factor de caracterización denominado *Potencial de calentamiento global (PCG)*. Estos factores están basados en la capacidad de cada gas para absorber calor relativo a la capacidad del CO₂, así como también la tasa de decaimiento de cada gas a través de los años. Un horizonte de 100 años es el más utilizado. El IPCC es una de las organizaciones más reconocidas en el desarrollo de PCGs

Algunas de las sustancias que contribuyen en el calentamiento global y por lo tanto deben ser evaluadas en la HC corresponden a:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- CFC's (CFC-11, -12, -113, -114, -115)
- HCFC's (HCFC-22, -123, -124, -141b, -142b)
- HFC's (HFC-125, -134a, -152a)
- Halógenos
- Tetraclorometano (CCl₄)
- 1,1,1- Tricloroetano (CCl₃CH₃)
- Monóxido de carbono (CO)

Los mecanismos relacionados con el calentamiento global y el cambio climático asociado son globales de la naturaleza. Lo que se traduce en que los impactos se modelan de igual forma independientemente de la zona geográfica dónde se produzca la emisión.

Como se mencionó anteriormente, una manera de poder comparar los impactos producidos en todas las categorías es realizando una normalización mediante valores de referencias. En la actualidad los valores están expresados en términos de kg CO₂-eq/capita/year. El impacto ambiental normalizado se expresa en personas equivalentes- es decir, relativo a la contribución anual del efecto de una persona en la zona afectada. Un factor de normalización que ha llegado a ser consensuado a nivel mundial es (Danish ministry of the environment, 2005)

$$F.N (PCG)= 8.7 \text{ ton CO}_2\text{-eq./cápita/año}$$

Además este impacto al tener carácter global permite utilizar un factor de normalización único sin importar la zona geográfica dónde se evalúa.

La huella de carbono puede ser medida para un producto, o para una organización completa e incluso se puede realizar la medición de un territorio o país. Para cada uno existe una metodología y normas específicas. En esta investigación el edificio es analizado como un producto, es por eso que se analizan las normas y metodologías para ese caso.

2.2.4.2 Huella de carbono de producto

El término “Huella de carbono de producto” se refiere a la suma de las emisiones y de las absorciones de gases de efecto invernadero asociadas a un producto, considerando su ciclo de vida y su impacto en el cambio climático. (BSI, 2013)

Recientemente, en el año 2013, se ha publicado la norma ISO/TS 14067:2013 *Huella de Carbono de Productos. Requisitos y directrices para la cuantificación y la comunicación*[17] la cual establece los principios, requisitos y directrices para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de productos (HCP), incluyendo tanto los productos y servicios, basados en las emisiones y absorciones de Gases de Efecto Invernadero durante el ciclo de vida del producto (BSI, 2013).

La norma ISO14067 está basada en la metodología de ciclo de vida que está contenida en el grupo de normas ISO14040. Además, se basa en el metodología planteada en Publicly Available Specification PAS2050 desarrollada por el mismo organismo, British Standards Institution BSI. Una de las mayores diferencias entre la norma ISO y PAS2050 es que la primera si entrega requisitos sobre comunicación de resultados mientras que PAS no lo hace.

Otra metodología internacionalmente aceptada es Green House Gas Protocol (GHG Protocol) la cual se puede encontrar en dos versiones, una para medición de huella corporativa y otra para medición de huella de productos utilizando un enfoque de ciclo de vida, esta última basada en el grupo de normas ISO14040 y PAS2050.

Para lograr un mejor entendimiento de las diferencias y similitudes de cada metodología, se realiza una revisión de los estándares de GHG Protocol y PAS2050 y la norma ISO14067 A continuación se muestra una tabla comparativa con los temas más relevantes para esta investigación

Tabla 2-2
Análisis y revisión de normas y estándares de Huella de carbono de productos

	Metodología		
	ISO 14067	PAS2050	GHG Protocol for Products
Objetivo y alcance	Cálculo de la contribución potencial de un producto al calentamiento global, expresado en términos de CO ₂ e cuantificando emisiones y remociones de GEI a lo largo de todo el ciclo de vida	Especifica requerimientos para la evaluación de emisiones de GEI del ciclo de vida de bienes y servicios (Productos) basado en el concepto de ACV con enfoque atribucional. Incorpora solamente el impacto de calentamiento global.	Establece requerimientos y guía para compañías y organizaciones para cuantificar y publicar un inventario de emisiones y remociones de GEI asociados a un producto. El objetivo principal es establecer un marco de trabajo para empresas que quieran realizar decisiones informadas sobre reducción de emisiones de GEI de productos. Utiliza el enfoque de ciclo de vida atribucional.
Límites del sistema	Debe ser acorde a la definición de los objetivos y alcance del estudio. En estudios B2C se deben incluir todas las etapas. En enfoques B2B se deben incluir todas las etapas hasta que el producto “sale” del sitio de producción. Cualquier omisión de alguna etapa del ciclo de vida debe ser bien justificada Si se utiliza un *PCR se debe definir de acuerdo a él.	Se debe considerar -Materias primas -Energía -“Capital Goods” -Fabricación y provisión del servicio - Operación de las instalaciones -Transporte -Almacenamiento -Fase de uso -Disposición final También establece las exclusiones al límite del sistema En un enfoque B2B se deben incluir todas las emisiones hasta el arribo del producto a la nueva organización Si se utiliza un PCR, los límites se deben definir de acuerdo a lo especificado en el documento.	Debe incluir todos los procesos atribuibles. Las organizaciones deben justificar cualquier exclusión del inventario. Para los productos finales se debe incluir todo el ciclo de vida (cuna-tumba). Para productos intermedios se debe utilizar un ciclo de vida parcial (cuna-puerta)
Unidad funcional	Es necesaria la definición de una unidad funcional que referencie todos los inputs y outputs considerados. La unidad funcional debe especificar claramente la función del producto a evaluar. Los resultados deben ser entregados	Los resultados deben ser expresados en masa de CO ₂ por unidad funcional	Para productos intermedios, se debe definir la unidad de análisis como un flujo de referencia. Para producto finales se debe definir la unidad funcional Los resultados deben ser expuestos en términos de la unidad funcional

	<p>en masa de CO₂e por unidad funcional</p> <p>Si se utiliza un PCR se debe definir de acuerdo a lo especificado en el</p>		
Datos	<p>Se debe recopilar toda la información acerca de emisiones de GEI y sus fuentes, así como también las remociones y los lugares donde se generan.</p> <p>Los datos se deben obtener para todos los procesos unitarios incluido en los límites del sistema</p>	<p>Se debe incluir todas las emisiones dentro de los límites del sistema que tengan el potencial de hacer una contribución material a las emisiones del ciclo de vida del producto. Se establecen reglas para la omisión de información.</p>	<p>Se debe recolectar la información para todos los procesos incluidos en los límites del sistema.</p> <p>Para todos los procesos propios o de los cuales la organización tenga control se debe utilizar información primaria</p>
Calidad de datos	<p>Se debe recolectar información específica (Primaria) del lugar de todos los procesos bajo control operacional o financiero de la organización.</p> <p>Información secundaria sólo se puede utilizar en caso que la primaria no se pueda obtener. También es válido para procesos de menor importancia</p> <p>La información puede ser medida o modelada, siempre y cuando sea específica para el proceso en el ciclo de vida del producto.</p> <p>La calidad de los datos debe caracterizarse de manera cuantitativa y cualitativa</p> <p>Establece reglas de calidad de datos que deben cumplirse</p>	<p>Se debe recolectar información primaria para aquellos procesos propios, operados o controlados por la organización. La información debe ser representativa del proceso para el cual se recolecta.</p> <p>La información secundaria debe ser utilizada cuando la primaria no sea requerida</p> <p>Establece reglas de calidad de datos que deben cumplirse</p>	<p>Para todos los procesos propios o de los cuales la organización tenga control se debe utilizar información primaria</p> <p>La información secundaria se puede utilizar solo cuando no se pueda obtener información primaria.</p> <p>Se debe evaluar la calidad de de los datos para las actividades, factores de emisión, y las datos de emisiones directas usando los indicadores de calidad.</p> <p>La información puede ser obtenida mediante mediciones, modelaciones o calculada</p>
Datos de emisiones de electricidad	<p>Se debe incluir:</p> <ul style="list-style-type: none"> -GEI relacionado a la generación de la electricidad -Pérdidas en la transmisión y distribución en la red -GEI de los procesos Upstream -GEI de los procesos Downstream -Emisiones de GEI relacionado con la construcción y demolición del sistema de provisión de electricidad 	<p>Se debe incluir:</p> <ul style="list-style-type: none"> -La cantidad de energía utilizada; y -El factor de emisión promedio para el tipo de energía, basado en las fuentes de energía usada. 	<p>- Recomienda que se utilicen factores de emisión que sean geográficamente específicos para el producto</p>
Período de tiempo de los datos	<p>Para emisiones y remociones que varían en el tiempo se debe recolectar información durante un período de tiempo apropiado para establecer un promedio de emisiones y remociones</p>	<p>Para emisiones y remociones que varían en el tiempo se debe recolectar información durante un período de tiempo apropiado para establecer un promedio de emisiones y remociones</p>	<p>Para emisiones y remociones que varían en el tiempo se debe recolectar información durante un período de tiempo apropiado para establecer un promedio de emisiones y remociones</p>
Cálculo de resultados del inventario	<p>El potencial de cambio climático para cada GEI emitido o removido por el producto debe ser calculado mediante la multiplicación de la masa de GEI por un un factor PCG-100 años dado por la IPCC en unidades de "kg CO₂e por kg emitido". La huella de carbono corresponde a la suma de esos impactos calculados</p>	<p>La información primaria y secundaria debe ser convertida a emisiones de GEI mediante los factores de conversión. Luego debe ser convertida a CO₂e mediante la multiplicación de la masa de GEI por un un factor PCG-100 años dado por la IPCC.</p> <p>Los resultados deben ser diferenciados si corresponde a B2B o B2C. Los resultados deben ser escalados para tomar en cuenta cualquier proceso que haya sido excluido del análisis.</p>	<p>Se debe aplicar un factor PCG de 100 años a las emisiones y remociones para calcular los resultados en unidades de CO₂e</p> <p>Sugiere utilizar los valores más recientes entregados por la IPCC.</p> <p>Los resultados se deben mostrar en porcentaje por cada etapa del ciclo de vida</p>

Evaluación de incertidumbre	En la interpretación del ciclo de vida, se debe realizar una evaluación cuantitativa o cualitativa de la incertidumbre de los resultados	No se especifica.	Establece que se debe reportar una declaración cualitativa sobre las fuentes de incertidumbre del inventario y las elecciones metodológicas. Además para el análisis de incertidumbre recomienda la herramienta de cálculo de incertidumbre de GHG Protocol.
Análisis de sensibilidad	Se debe realizar un análisis de sensibilidad para todos los inputs, outputs y elecciones metodológicas realizadas.	Tiene carácter opcional. Se recomienda un análisis de MonteCarlo.	No especifica
Comunicación de la huella de carbono	Se presentan una de directrices y requerimientos para una comunicación pública de la huella de carbono	No especifica requerimientos de comunicación	Se presentan directrices y requerimientos sobre la información y la manera en que debe ser expuesta al público

*PCR: Product Category Rules. Reglas de categoría de Productos

En la siguiente se figura se relaciona cada uno de estos aspectos con la metodología propuesta por ISO para llevar a cabo un ACV

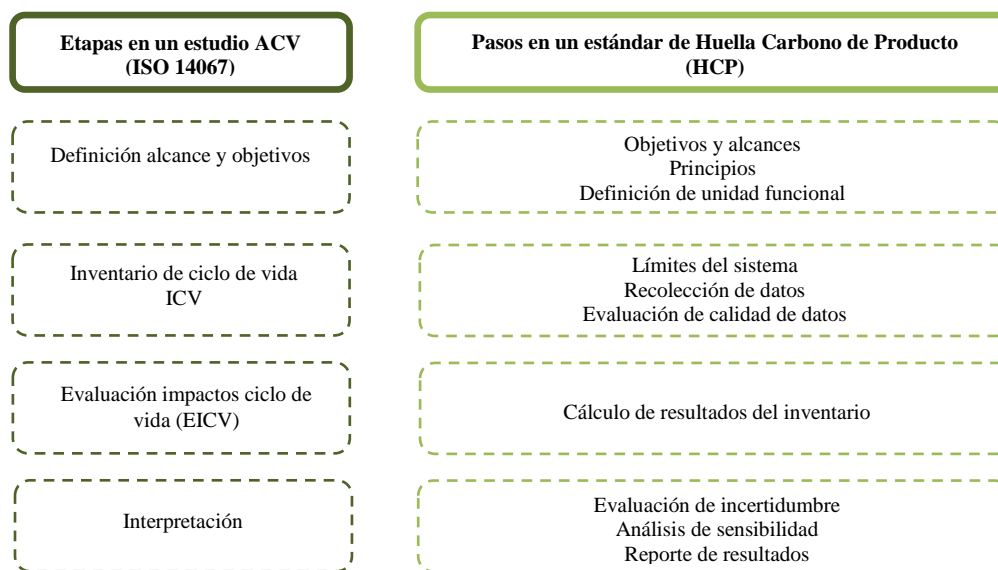


Figura 2-10: Correlación entre pasos de estándares HCP y ACV

2.3 Revisión y discusión de aspectos claves de la metodología a definir

2.3.1 Límites del inventario.

De acuerdo a la norma EN 15978:2012, la energía de uso operacional se puede dividir en 3 grupos de uso (EeBGuide, 2012):

- **Uso relacionados con el edificio:** Calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente sanitaria, iluminación y servicios auxiliares.
- **Otros usos relativos a sistemas integrados:** ascensores, persianas automáticas, seguridad, comunicaciones, etc.
- **Otros usos no relacionados con el edificio:** ordenadores, refrigeradores, máquinas, etc. relacionadas con la actividad del edificio

En dicha norma le dan prioridad a la categoría de energía relacionada con el edificio. Sin embargo se considera que para este caso de estudio es importante considerar los 3 usos debido a que se pretende realizar un estudio acabado de los consumos energéticos del edificio durante su fase de uso.

Para estimar la energía perteneciente a cada una de las categorías es necesario conocer los consumos de *uso final de energía*, esto es, cuanta energía es consumida por cada uno de los sistemas instalados al interior del edificio. Una vez hecho este cálculo, los consumos de uso final se asignan a cada categoría.

La importancia de poder categorizar la demanda energética en estos tres grupos de usos radica en el hecho de que las soluciones de mejora y eficiencia energética son distintas para cada grupo. Por ejemplo para el caso de usos relacionados con el edificio, las soluciones corresponden principalmente a mejoras en la construcción y en los equipos instalados en complemento con los patrones de uso de las personas. En cambio en el caso de Otros usos no relacionados con el edificio, las soluciones están relacionadas principalmente con los patrones de comportamiento de los usuarios y las distintas actividades realizadas al interior del edificio.

2.3.2 Recolección de datos

La recolección de datos es una de las etapas más complejas e importantes en el cálculo de huella de carbono. Además de la importancia de recolectar toda la información relacionada con las actividades incluidas dentro del sistema a analizar, resulta igualmente relevante asegurar la calidad de esta información.

La información recolectada debe asegurar una representación verídica y confiable del comportamiento energético del edificio. En el caso de los edificios es necesario contar con los registros históricos de consumo de al menos un año de funcionamiento (EN15804:2012) para así poder interiorizar la variabilidad estacional del consumo energético y poder establecer relaciones

entre las distintas variables (clima, patrones de uso, equipos instalados, etc.). Algunos ejemplos registros de consumo energético pueden ser las facturas mensuales proporcionadas por el proveedor o mediciones propias realizadas con instrumentación instalada en el edificio.

Como se analizó en la revisión acerca de los límites del sistema, otro requisito importante es el desglose de la energía en los distintos tipos de uso. Para obtener este desglose de consumos es necesario contar con instrumentación de medición al interior del edificio, ya que por medio de las facturas solo se obtiene un total general de los consumos. Esta instrumentación puede resultar ser costosa y es aplicable solamente si el tablero eléctrico está lo suficientemente organizado de manera de poder separar los consumos de cada sistema.

Cuando existan vacíos de datos, una posible solución es obtenerlos mediante una modelación. En términos científicos, una modelación puede ser clasificada en dos categorías (Saltelli, 2008); Diagnóstico o pronóstico y Basada en datos, la primera categoría se utiliza para predecir el comportamiento de un sistema mientras que en la segunda se utiliza el comportamiento observado del sistema para predecir propiedades del mismo. En términos de modelación energética de edificios, la segunda categoría se refiere a los métodos que utilizan información monitoreada del comportamiento para producir modelos que sean capaces de predecir de manera adecuada el comportamiento, enfoque que resulta útil para complementar los vacíos de datos. Los métodos que utilizan este enfoque pueden ser separados en tres categorías (Reddy TA, 2002);

- Enfoque de Caja-Negra: Esta referido al uso de matemáticas simple o modelos estadísticos que relacionan un conjunto de *inputs* relevantes (ej, ocupación y clima) con los datos medidos.
- Enfoque Caja-Gris: La diferencia con el enfoque de caja negra es que se usan solo algunos parámetros claves del sistema los cuales se identifican a través de un modelo físico del sistema
- Calibración detallada del modelo: Este enfoque utilizada un modelo que represente completamente al edificio y configura los inputs involucrados para coincidir con los datos medidos. Este enfoque provee la descripción más detallada del comportamiento del edificio.

De los tres enfoques, el último es el que entrega información más completa del edificio y además tiene la capacidad de vincular los aspectos físicos, los sistemas y los parámetros ambientales. Esta última característica es determinante para la elección de este enfoque ya que esta capacidad de vincular todos los aspectos involucrados en el comportamiento del edificio permite analizar las influencias de cada decisión a lo largo del ciclo de vida del edificio, es decir, encaja con el enfoque de cálculo para la huella de carbono de productos.

Se tiene entonces que mediante la realización de una simulación energética se pueden cumplir dos grandes objetivos; el primero consiste en completar eventuales vacíos de información sobre el consumo energético o suplir la ausencia de un desglose de uso energético de cada sistema. Por

otro lado, el segundo objetivo tiene relación con entender los impactos de cada elemento o decisión en ciclo de vida del edificio. Este último objetivo resulta muy útil cuando se quieren reducir las emisiones de GEI mediante estrategias de eficiencia energética

Para llevar a cabo la modelación y calibración se identifican 4 grandes etapas

- Auditoría: Normalmente se realiza una auditoría antes de realizar el modelo para obtener un mejor conocimiento de los sistemas del edificio y sus características
- Levantamiento de información correspondiente al edificio (Planos, equipos instalados, patrones de uso, etc.)
- Generación del modelo computacional utilizando softwares de simulación
- Calibración del modelo computacional comparando y analizando resultados de la simulación con los datos medidos.

Los diferentes procesos de calibración se pueden separar en dos categorías generales, las cuales corresponden a (Daniel Coakley, 2014)

- i. Manuales – Aquellos enfoques basados mayormente en intervenciones iterativas por parte del modelador. Incluye cualquier método que no emplee ninguna forma de calibración automatizada mediante métodos analíticos/matemáticos u otros
- ii. Automatizada – Enfoques automatizados son aquellos que poseen procesos automáticos (es decir, no a través del usuario) para asistir o realizar la calibración del modelo

A nivel global, está mucho más desarrollado el enfoque manual, en la revisión realizada por Daniel Coakely et. al [21]. se presenta el siguiente gráfico

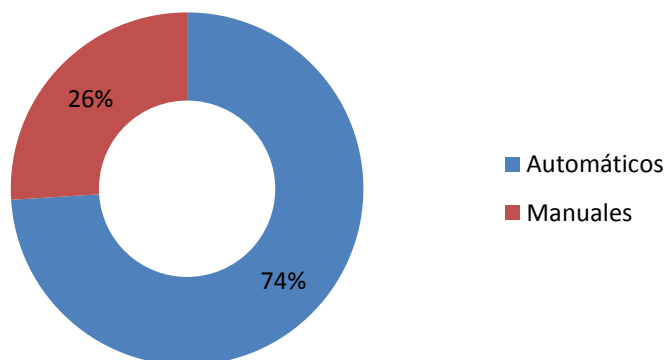


Figura 2-11: Porcentaje de enfoques de calibración (Daniel Coakley, 2014)

A la fecha se han desarrollado algunas metodologías de calibración de modelos de edificios existentes. La metodología que se propone en este trabajo está basada en los siguientes 3 estándares internacionales

- ASHRAE Guideline 14-2002: Measure of energy and demand savings (ASHRAE Standards Committee, 2002) [6]
- M&V Guidelines: Measurement and verification of federal energy projects (FEMP) (U.S. DOE, 2000) [29]
- IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol) (IPMVP, 2002).[33]

2.3.3 Cálculo de emisiones

Debido a que el enfoque de cálculo elegido corresponde al análisis de ciclo de vida, es necesario asegurar que al momento de considerar las emisiones de GEI por la operación del edificio, se incluyan las emisiones de todo el ciclo de vida de la energía.

Cuando se registran los consumos al interior del edificio, se está midiendo la *Energía final*. Si el cálculo de emisiones se obtiene de la multiplicación entre esta energía y el factor de emisión, se excluyen del análisis una serie de emisiones, las cuales se relacionan con los procesos previos a que la energía esté disponible para su uso en el edificio. Dichos procesos tienen que ver con la transformación, el transporte y la distribución (considerando que el factor de emisión utilizado no incluye estos aspectos)

Para incorporar todos los procesos mencionados, es necesario trabajar con el consumo de energía primaria, la cual se define de manera gráfica en la siguiente figura



Figura 2-12: Desglose pérdidas de energía a lo largo de sus etapas

Para la conversión de energía de uso final a energía primaria, se debe multiplicar por un factor de conversión previamente calculado y publicado de manera oficial. En el caso de Chile, dicho factor no ha sido desarrollado hasta la fecha.

Para el caso del consumo eléctrico, además de utilizar valores de energía primaria, es necesario conocer las emisiones de GEI emitidas por la central generadora por cada kWh producido. Este

valor debe ser conocido para todas las centrales conectadas al sistema que provee electricidad al edificio. Con las otras fuentes de energía debe realizar un análisis similar.

Si bien a la fecha han sido publicados de manera oficial los factores de emisión para distintas fuentes de energía en Chile, estos no consideran el ciclo de vida completo. Se espera que en un futuro se calculen nuevamente estos factores utilizando dicho enfoque.

Se tiene entonces que la única posibilidad es calcular las emisiones de GEI relacionadas con la energía de Uso final y sin la consideración del ciclo de vida completo. Los factores están disponibles en el Ministerio del Medio Ambiente (MMA).

El factor de emisión relacionado al sistema interconectado central, correspondiente al año 2013 es:

$$FE_{SIC}: 0,432 \frac{tCO_{2eq}}{MWh}$$

El cual es calculado utilizando la herramienta metodológica “Tool to calculate the emission factor for an electricity system”[18]

En el portal web del ministerio (www.minenergia.cl) se encuentran factores de emisión para el resto de los combustibles utilizados en Chile.

2.3.4 Evaluación de incertidumbre

Las incertidumbres se pueden clasificar en dos grandes categorías (GHG Protocol)

1. **Incertidumbres Científicas:** Aparece debido a que no existe un acabado conocimiento científico acerca del proceso de emisión. Un ejemplo de esta categoría corresponde a los potenciales de calentamiento global (GWP) utilizados. Analizar y cuantificar este tipo de incertidumbre es muy complejo y normalmente se encuentra fuera de los objetivos de las organizaciones que miden sus emisiones
2. **Incertidumbres de estimación:** Surge cada vez que son cuantificadas las emisiones de GEI. Por lo tanto todas las emisiones que se cuantifiquen tienen asociado un grado de incertidumbre

A su vez, se pueden definir 3 tipos de incertidumbre en las estimaciones (Marka Huijbregts, 2003), las cuales se pueden clasificar en incertidumbres de parámetros, escenario y modelo.

Para la cuantificación de la incertidumbre de parámetros existen distintos enfoques, dos de ellos normalmente utilizados corresponden a (Endong Wang, 2012):

- Matriz Pedigree, basada en indicadores de calidad de datos (ICD).
- Métodos estadísticos, se expresa a través de desviaciones estándar

El método ICD estima la confiabilidad y la incertidumbre de los datos basado en metadatos descriptivos y experticia del evaluador. Se pueden realizar análisis de tipo cualitativo o también cuantitativo. La propagación de estos valores se puede realizar utilizando simulaciones de Monte Carlo o expansiones de series de Taylor (GHG Protocol). Por otro lado, los métodos estadísticos caracterizan un rango de datos mediante distribuciones probabilísticas, para esto se hace necesario tener varias muestras de datos. En términos de costo, el método ICD es más económico que el método estadístico, sin embargo, este último es más certero. ICD es aplicado cuando no es necesaria una gran precisión o cuando el muestreo de datos no es suficiente para realizar análisis estadísticos. Por último, el enfoque ICD es importante cuando los valores de incertidumbre son obtenidos desde la literatura mientras que para valores obtenidos directamente de los procesos entra en juego el enfoque estadístico (Sugiyam et al, 2005)

En la siguiente tabla se muestra un resumen de ventajas y barreras de cada uno de los enfoques descritos

Tabla 2-3
Comparación entre métodos de análisis de incertidumbre

Enfoque	Ventajas	Barreras
Índice calidad de datos, ICD	Bajo costo de implementación	Poca precisión en la estimación de incertidumbre
	Permite la realización de un análisis cuantitativo y cualitativo	Alto contenido de subjetividad
Métodos estadísticos	No es necesario una muestra de datos	
	Puede llegar a ser un método muy preciso.	Alto costo de implementación
	Se obtiene una distribución probabilística realista del parámetro evaluado	Es necesario una gran cantidad de información

Además de estos dos enfoques de evaluación de incertidumbre existen enfoques mixtos, uno de ellos es el desarrollado por Endong Wang y Zhigang Shen, denominado “*Hybrid DQI-Statistical (HDS)*” [27] que combina propiedades del método ICD y del estadístico, obteniendo resultados mas precisos que un análisis puramente con ICD y a la vez bajando la complejidad y costos de uno puramente estadístico.

De las descripciones anteriores se puede apreciar que resulta complejo realizar una cuantificación exacta de la incertidumbre asociada a las mediciones, además se debe tener en cuenta el hecho que todas las suposiciones realizadas a lo largo del estudio tienen un componente de subjetividad importante. Se puede concluir entonces que el cálculo de la incertidumbre es en sí mismo muy incierto. Sin embargo estos problemas se ven superados cuando dos productos similares son evaluados mediante una metodología igual, en ese caso las incertidumbres científicas y aleatorias pueden ser, en su mayoría, ignoradas (GHG Protocol).

Si bien en todos los estándares revisados se recalca la importancia de un análisis y reporte de incertidumbre, no en todos es obligatorio y siempre queda a libre elección del evaluador la metodología a utilizar para realizar la estimación. Una alternativa para superar los problemas relacionados a la incertidumbre, en particular con la incertidumbre de escenario y en parte las de modelo, es la utilización de una metodología idéntica para la evaluación y comparación de productos similares. Es por este motivo que se considera primordial que la metodología en desarrollo en este trabajo defina un procedimiento único para la estimación de incertidumbre el cual debe ser claramente definido.

Si se quiere definir un método único para la evaluación de incertidumbre hay que tener en consideración que el método elegido tenga la capacidad de ser replicado por todos los usuarios, para cumplir con esto se debe asegurar no definir un método muy complejo y/o costoso. Por otro lado, en la adquisición de datos acerca del comportamiento energético del edificio no siempre se consigue un muestreo de datos sino que a veces se puede dar el caso de tener un único valor. Se considera que para poder abarcar la mayor cantidad de casos de estudio se debe implementar el método de Índice de calidad de datos, ICD, ya que es más flexible, económico y se podrá aplicar en todos los casos.

2.3.5 Estructura de la metodología a definir

De la revisión realizada a lo largo del presente capítulo, se define la siguiente estructura de la metodología a desarrollar, además se expone la norma o estándar en el cual se basa, mayormente, cada una de las partes de la metodología

Tabla 2-4

Estructura de la metodología a definir y documentos en los que se basan

Estructura	Norma/estándar
1.-Objetivos y alcance	Definición propia.
2.-Unidades	EN15978:2012
3.-Equivalente Funcional	EN15978:2012
4.-Límites del sistema	EN15978:2012
6.-Recolección de datos	Definición propia.
7.-Evaluación calidad de datos	GHG Protocol
8.-Cálculo de emisiones GEI	ISO14067:2013
9.-Evaluación de incertidumbre	GHG Protocol
10.-Reporte de resultados	Definición propia.

Capítulo 3. Definición de metodología propuesta

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la evaluación de huella de carbono de la energía en la etapa operacional de un edificio existente. El enfoque presentado está referido a edificios comerciales, específicamente a oficinas.

La metodología se basa en las normas ISO 14067:2013 de huella de carbono de productos y las normas EN15804:2012 y EN15879:2012 relacionadas con el análisis de ciclo de vida en la construcción. El enfoque de cálculo es el Análisis de ciclo de vida de la energía, ACVE, el cual se encuentra normado en el grupo de normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Por último, la metodología se complementa de los requerimientos establecidos en los estándares PAS2050 y GHG Protocol for Products en conjunto con los resultados publicados en estudios de ACV realizados a edificios a la fecha. Lo anterior, se resume en el siguiente esquema

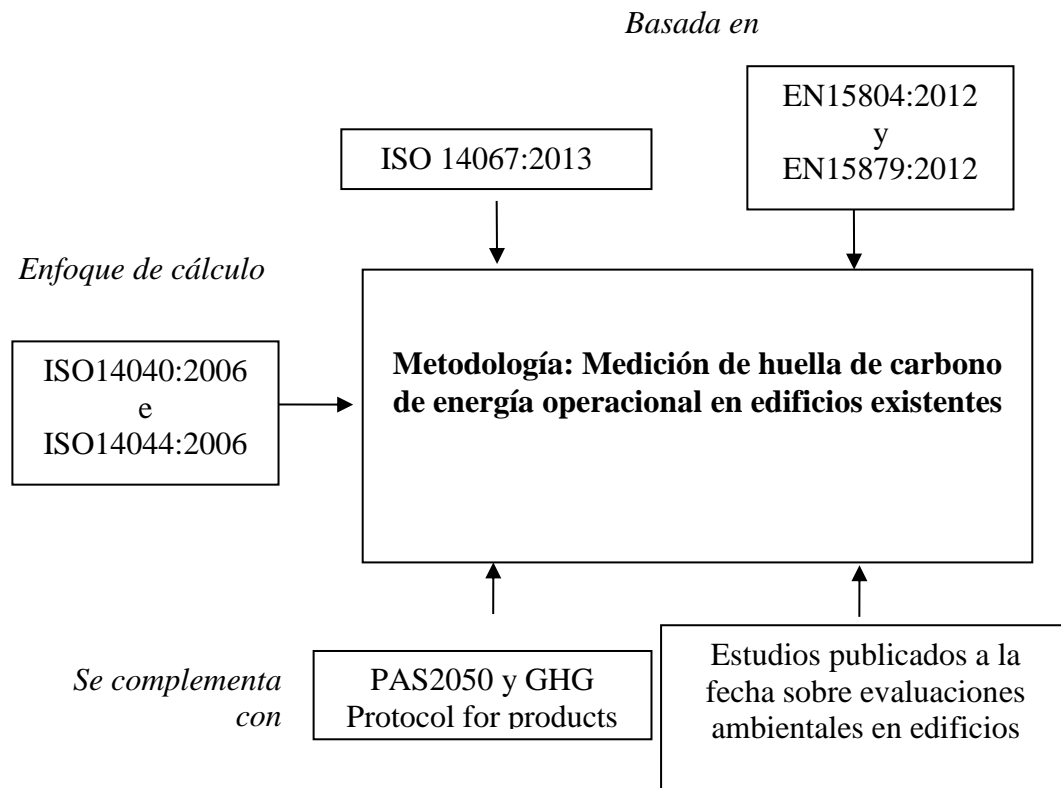


Figura 3-1: Marco normativo de la metodología en desarrollo

La metodología desarrollada en este estudio propone una solución cuando se presenta algunos de estos problemas

- **Vacios de información:** Cuando la información de consumos energéticos no abarque un año completo y/o continuo de operación o cuando la información no se encuentre desagregada en los diferentes consumos finales de energía.
- **Sistemas centralizados de provisión o registro de consumos energéticos:** En el caso que la provisión de energía o el registro de consumos sea de manera centralizada y no se pueda conocer el consumo energético para un edificio o zona de manera aislada.

La solución propuesta consiste en la obtención de datos a través de una simulación energética del edificio, la cual se debe calibrar con la información de consumo disponible para asegurar que los resultados obtenidos a través del modelo representen de manera certera los reales.

A lo largo de este documento se establecen requisitos para la evaluación del comportamiento energético y cálculo de emisiones de GEI, además se especifica el contenido que debe contener el reporte del cálculo de huella de carbono realizado.

Cada sección de la metodología puede ser relacionada a una etapa de un Análisis Ciclo de Vida. Las correspondencias se muestran en la siguiente figura

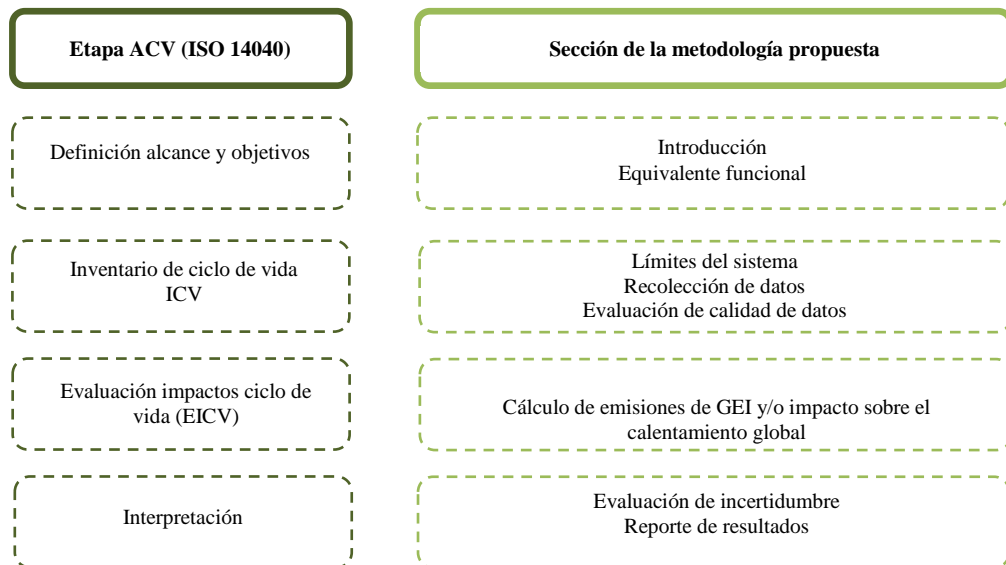


Figura 3-2: Correspondencia etapas de ACV y metodología propuesta

3.2 Objetivos y alcance

El objetivo de la presente metodología es especificar requerimientos para la evaluación de Huella de carbono en edificios existentes, basado en el concepto de Análisis de Ciclo de vida atribucional.

El cálculo de huella de carbono se realiza considerando solamente las emisiones relacionadas a la energía consumida durante la etapa operacional del edificio en estudio.

3.3 Unidades

Se debe utilizar el sistema internacional de unidades (SI). Y específicamente, para la potencia y energía se usarán las siguientes medidas

- kW para potencia
- kWh para energía

3.4 Equivalente funcional

El Equivalente funcional corresponde a la base de comparación. Se define como la representación de las características técnicas y funcionales requeridas del edificio. El equivalente funcional debe incluir, como mínimo, los siguientes aspectos

- Tipo de edificio: un edificio residencial, hospital, oficina, etc.
- Requisitos técnicos y funcionales relevantes: Ya sean requisitos del cliente o requisitos derivados de normativa legal.
- Patrón de uso, ocupación, relación básica de actividades desarrolladas en el edificio, etc.
- Vida de servicio o vida útil.

3.4.1 Vida de servicio

Este valor debe ser determinado considerando una serie de variables a lo largo todo el ciclo de vida del edificio. Se considera una vida de servicio de 50 años. La utilización de este valor fijo favorece la comparación.

3.5 Límites del sistema

Para las etapas del ciclo de vida de la construcción se utiliza la clasificación utilizada en EN15978:2012

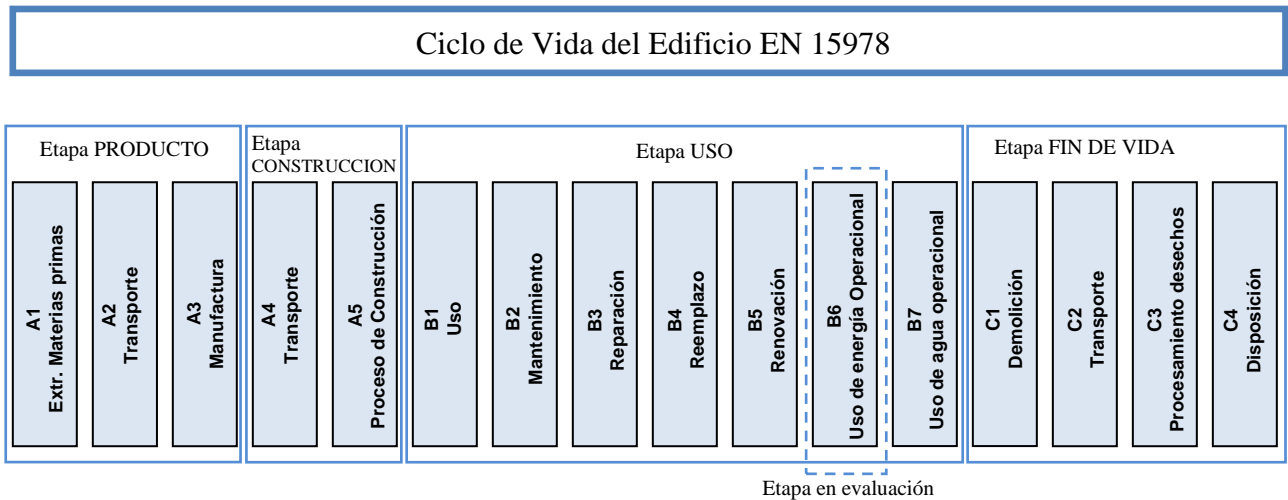


Figura 3-3: Etapa del ciclo de vida abarcada en la metodología

La metodología está dirigida a la evaluación de las emisiones generadas por el consumo energético en la etapa de operación del edificio, es decir, al módulo B6

En concordancia a la norma EN 15978:2012, la energía de uso operacional se puede dividir en 3 grupos de uso

- **Uso relacionados con el edificio:** Calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente sanitaria, iluminación y servicios auxiliares.
- **Otros usos relativos a sistemas integrados:** ascensores, persianas automáticas, seguridad, comunicaciones, etc.
- **Otros usos no relacionados con el edificio:** ordenadores, refrigeradores, máquinas, etc. relacionadas con la actividad del edificio

En el inventario se deben considerar las emisiones relacionadas a cada uno de estos 3 grupos de energía y se deben comunicar de manera separada.

3.5.1 Límites geográficos de aplicación

En principio, esta metodología está desarrollada para edificios que estén conectados energéticamente al sistema interconectado central, SIC. Para utilizarlo en otra red nacional se deben hacer los ajustes correspondientes en los factores de emisión.

3.5.2 Límites temporales

La información necesaria para llevar la evaluación debe contemplar el comportamiento del edificio durante un año completo. Además la información, la cual debe ser específica del edificio en estudio, debe tener como máximo 2 años de antigüedad y representar las condiciones actuales del edificio.

3.6 Recolección datos

Se debe recolectar datos para todos los procesos incluidos dentro de los límites del sistema. Se debe utilizar información específica del edificio, y evitar al máximo el uso de información general. Se debe documentar y transparentar el tipo de información y justificar el uso de información no específica. A su vez, se deben disminuir al máximo las suposiciones y juicios priorizando la información más exacta. Todas las suposiciones y estimaciones deben ser claramente documentadas en el reporte final.

Si existen mediciones históricas de los consumos energéticos del edificio, estos deben ser usados para calcular la demanda energética. Se debe verificar que la información registrada cumpla los objetivos y el alcance del estudio. Por otro lado, es necesario que estos registros se encuentren desglosados en los distintos grupos de uso; *Usos relacionados al edificio, Otros usos de relativos a sistemas integrados, Otros usos no relacionados con el edificio.*

Cuando existan vacíos de información o no esté desglosada por categoría, esta metodología plantea una metodología mixta de obtención de consumos, la cual se basa en la generación de un modelo computacional del edificio desarrollado en un programa de simulación energética tal como DOE-2, BLAST, ESP-r, o ENERGY PLUS, el cual se debe calibrar con registros de mediciones de consumo energético del edificio. La metodología de calibración puede variar de acuerdo a la información registrada disponible (mensual, horaria).

Los pasos a seguir para la calibración, en concordancia con ASHRAE 14, son:

- i) **Generación de un plan de una simulación calibrada:** Dependiendo la precisión que se quiere lograr, se debe decidir el nivel de complejidad del modelo a realizar. Además, se debe elegir el software a utilizar, el cual al menos debe ser capaz de simular de manera horaria para todo el año (8760 horas). Por último, se deben

establecer las tolerancias de calibración para el estudio, la cuales, dependiendo si se realizará una calibración mensual u horaria, corresponden a:

Tabla 3-1
Índices de tolerancia de calibración

	Máximo
<i>*CV(RMSE)</i> _{Mensual}	±5%
<i>**NMBE</i> _{Mensual}	±15%
<i>CV(RMSE)</i> _{Horaria}	±10%
<i>NMBE</i> _{Horaria}	±30%

***CV(RMSE):** Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error

****NMBE:** Normalized Mean Bias Error

ii) Levantamiento de información:

- a. Planos del edificio:** Planos de arquitectura, sistemas de clima, electricidad y cualquier otro que sea pertinente.
- b. Datos de consumo:** Se debe recopilar la mayor cantidad de información de consumos, asegurando que cumplan el límite temporal y sean representativos de las condiciones actuales. Se puede obtener mediante facturas o mediciones hechas directamente en los tableros, de manera mensual u horaria, asegurando que los datos medidos representen a todos los consumos a evaluar.
- c. Características de los sistemas instalados:** Se debe registrar las características de cada equipo perteneciente a los sistemas instalados (ej. HVAC, iluminación, comunicaciones). Entre ellas, la más importante para estimar el consumo es la potencia.
- d. Patrones de uso:** Se debe averiguar los horarios de funcionamiento y patrones de utilización de cada equipo perteneciente a los sistemas instalados en el edificio.
- e. Datos de clima:** Para la simulación energética se debe utilizar un archivo de clima que sea lo más representativo posible del lugar donde se emplaza el edificio.

iii) Creación del modelo inicial: Como mínimo se debe considerar la siguiente información

- a. Orientación
- b. Características envolvente del edificio
- c. Zonificación
- d. Puertas y ventanas
- e. Sistemas de HVAC y patrones de uso
- f. Características y patrones de uso de iluminación
- g. Otros equipos instalados
- h. Ocupación

i. Clima de la zona

iv) **Calibración del modelo:** Dependiendo el nivel de detalle que se quiera lograr y la información disponible se pueden utilizar 3 enfoques distintos

- a. Comparaciones de uso mensuales del modelo con facturas de consumo mensual del edificio
- b. Comparaciones de uso mensuales del modelo con facturas de consumo mensual del edificio en combinación con comparaciones entre predicciones de uso de los sub-sistemas en el modelo con las mediciones horarias de estos
- c. Comparación de uso horaria del modelo con mediciones horarias del edificio.

Se debe comparar el modelo con la información registrada, si no se cumple con las tolerancias de calibración establecidas en el primer paso se debe ajustar el modelo y hacer nuevamente las comparaciones pertinentes. En caso que las tolerancias sean cumplidas, se puede utilizar la información de consumos entregada por la simulación del edificio.

3.7 Evaluación calidad de datos

Durante el proceso de recolección de datos, se debe realizar una evaluación de la calidad de éstos mediante *Indicadores de Calidad de Datos*.

Como regla general se debe utilizar información específica del edificio, se debe procurar que se realicen todos los esfuerzos posibles para cumplir este requerimiento. En caso de utilizar información genérica u otro tipo esta se debe justificar y transparentar.

Se aplican los siguientes indicadores para usar en la evaluación de la calidad de datos

- **Integridad:** El porcentaje de datos que están siendo medidos y el grado en que los datos representan la población de interés (¿es el tamaño de muestra suficientemente grande?, ¿es la periodicidad de la medida suficiente?, etc)
- **Representatividad temporal:** Edad de la muestra de datos. El grado en que la información representa el presente del proceso
- **Representatividad geográfica:** El grado en que los datos reflejan la ubicación geográfica actual del proceso dentro de los límites del inventario.
- **Representatividad tecnológica:** El grado en que los datos reflejan la tecnología actual usada en los procesos

- **Precisión de la información:** Cantidad de información primaria e información secundaria utilizada. Datos específicos del edificio deben ser siempre preferidos.

3.8 Cálculo de emisiones de GEI

El procedimiento de cálculo de emisiones a aplicar corresponde al descrito en la norma ISO 14067:2013.

El cálculo de emisiones se debe realizar considerando toda la información recopilada en los pasos anteriores. Se deberá cuantificar y reportar el total de emisiones en toneladas de CO₂ equivalente, que incluye todas las emisiones incluidas en el límite del sistema.

Los resultados deben ser desagregados por cada categoría de uso; *Usos relacionados al edificio, Otros usos relativos a sistemas integrados, Otros usos no relacionados con el edificio*

El factor de conversión a utilizar corresponde al entregado por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, el cual corresponde a:

$$F.E_{SIC} = 0,432 \frac{tCO_2eq}{MWh}$$

Existe la opción de presentar los resultados de emisiones de manera normalizada para una futura comparación de estos resultados con los asociados a otras categorías de impacto. El factor de normalización a utilizar corresponde a

$$F.N (PCG) = 8.7 \text{ ton CO}_2\text{-eq./cápita/año}$$

3.9 Evaluación de incertidumbre

La verificación de incertidumbre se realizará siguiendo las recomendaciones del GHG Protocol, utilizando una matriz Pedigree para calcular la desviación estándar de cada parámetro y utilizando una expansión de Taylor o simulación de Monte Carlo para la propagación.

La matriz Pedigree a utilizar corresponde a la planteada por GHG Protocol en su documento *Quantitative Uncertainty Guidance*, la cual se presenta a continuación

Tabla 3-2
Matriz pedigree para evaluación de datos

Indicador	Muy bueno	Bueno	Suficiente	pobre
Precisión	1.00	1.10	1.20	1.50
Integridad	1.00	1.05	1.10	1.20
Representatividad temporal	1.00	1.10	1.20	1.50
Representatividad geográfica	1.00	1.02	1.05	1.10
Representatividad tecnológica	1.00	1.20	1.5	2.00

Luego la incertidumbre total del parámetro, expresado con un 95% de confianza, es calculada usando la siguiente fórmula

$$SD_{g95} \cong \sigma_g^2 = \exp^{\sqrt{(\ln(U_1))^2 + (\ln(U_2))^2 + (\ln(U_3))^2 + (\ln(U_4))^2 + (\ln(U_5))^2 + (\ln(U_b))^2)}$$

En dónde

U_1 = Factor de incertidumbre de precisión

U_2 = Factor de incertidumbre de integridad

U_3 = Factor de incertidumbre representatividad temporal

U_4 = Factor de incertidumbre representatividad geográfica

U_5 = Factor de incertidumbre representatividad tecnológica

U_b = Factor de incertidumbre básico

GHG Protocol recomienda utilizar un factor de incertidumbre básico $U_b = 1.05$.

3.10 Reporte de resultados

El informe sobre el comportamiento energético del edificio debe incluir al menos la siguiente información

- a) Información general del caso de estudio
 - a. Propósito del estudio
 - b. Identificación del edificio
 - c. Antecedentes
 - d. Descripción del edificio
- b) Desarrollo evaluación huella de carbono

- a. Alcance
- b. Equivalente funcional
- c. Límites del sistema
- d. Recolección de datos
- e. Evaluación calidad de datos
- f. Cálculo de emisiones GEI
- g. Evaluación de incertidumbre

Capítulo 4. Caso de estudio, medición huella de carbono edificio IDIEM

4.1 Información general del caso de estudio

4.1.1 Propósito

El propósito de este trabajo corresponde a la medición de la Huella de Carbono de la energía operacional de una planta de oficinas, correspondientes a la división Construcción, al interior del edificio del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales, IDIEM, perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Las oficinas en estudio poseen remarcadores de consumo de electricidad, de los cuales se cuenta con un registro diario de los consumos de electricidad. Sin embargo, las mediciones no abarcan un año completo de operación por lo tanto se considera oportuna la aplicación de la metodología de obtención de datos mediante una simulación calibrada del edificio para completar la información de los meses en que no se realizó medición. Otras fuentes de energía no son utilizadas al interior de la división Construcción, por lo tanto sólo se estudia el consumo de electricidad.

Si bien existen remarcadores que registran información de consumos energéticos para el edificio completo de IDIEM, la decisión de elegir solamente la división Construcción para este estudio se basa en que la información para estas oficinas se encuentra desagregada en los diferentes tipos de utilización final de energía, si bien la metodología propuesta tiene como objetivo suplir esta ausencia, se considera importante, a modo de validación del proceso de obtención de datos propuesto, contar con esta información para poder comparar los resultados de la calibración no sólo en el total de energía consumida sino que a nivel de cada sistema instalado (HVAC, Iluminación, Equipos de oficina). Los resultados y conclusiones de dicho análisis resultan muy útiles para evaluar la efectividad de la metodología, en términos de precisión de resultados, para el caso de obtención de datos de manera desagregada para cada consumo final mediante el proceso de simulación.

4.1.2 Identificación del edificio

Las oficinas a evaluar son parte de la división Construcción, la cual se encuentra ubicada al interior del edificio IDIEM, ubicado en Plaza Ercilla Poniente, 883, Santiago. El edificio fue construido a fines de los años 50. Su superficie total es cercana a los 7500 m² mientras que la zona en estudio posee un área de aproximadamente 130 m².

El año 2012 esta sección fue completamente remodelada, se instalaron equipos de menor consumo energético y se modificó la tabiquería interior. Ningún cambio en la envolvente fue realizada. A continuación, *Figura 4-1*, se presenta un plano de la planta correspondiente al primer piso del edificio IDIEM, dónde se encuentran las oficinas en estudio

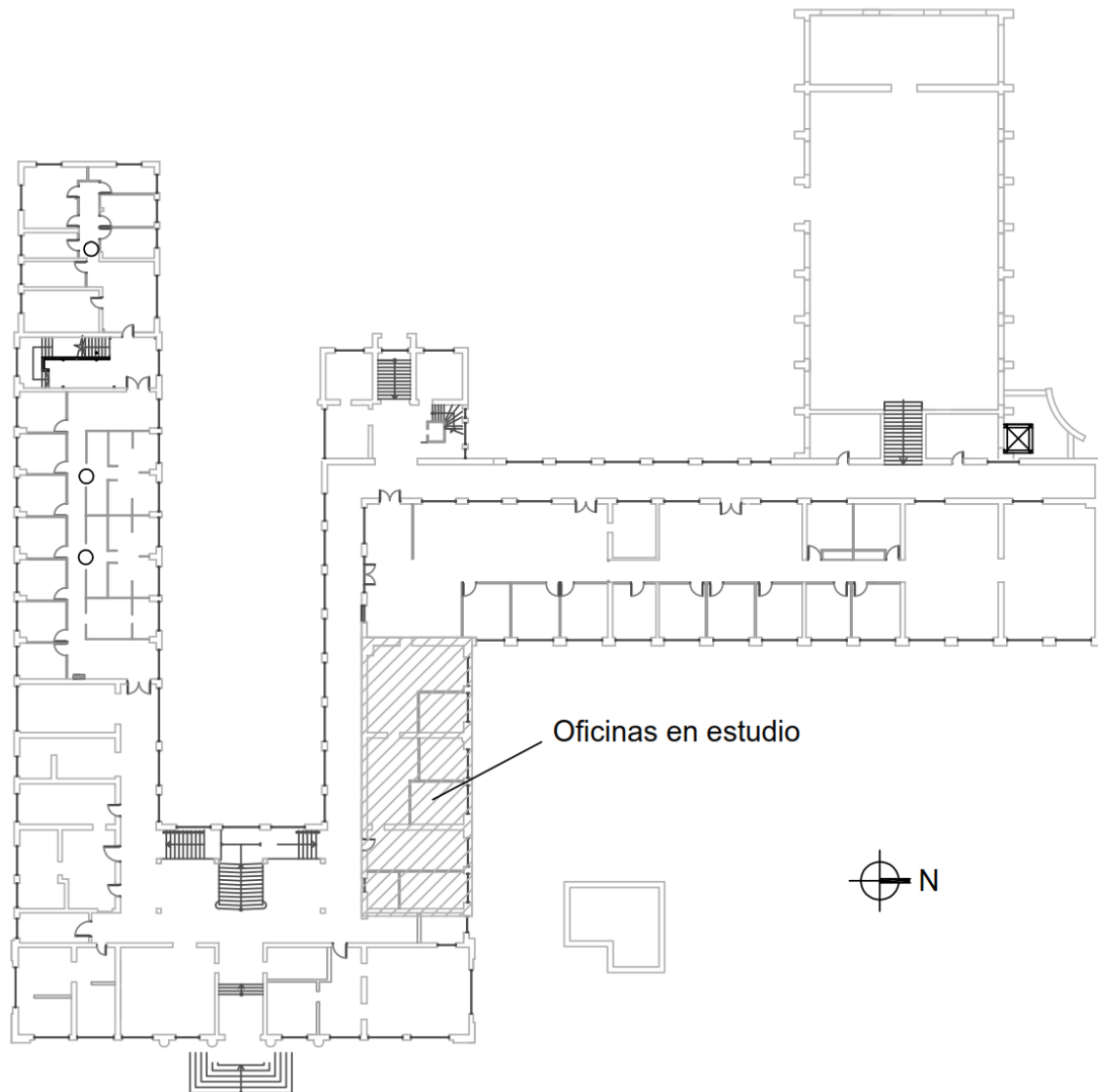


Figura 4-1: Planta primer piso Edificio IDIEM y zona en estudio

Al interior, se encuentran espacios utilizados como plantas de oficinas, oficinas individuales, zona de recepción y sala de reuniones (Ver Figura 4-4)

4.1.3 Antecedentes

Planos del edificio

Solo existen planos de arquitectura del edificio IDIEM. Planos de detalles constructivos, instalaciones eléctricas y sanitarias no están disponibles. Los planos de arquitectura corresponden a un modelo 2-D realizado en AutoCAD el cual no representa la condición actual de zona en estudio debido a que esta fue remodelada profundamente el año 2012. Es por esto que se realiza

un levantamiento en terreno de la información de la arquitectura para la confección de un plano actualizado (*Ver Figura 4-4*). Al interior de la zona en estudio no existen instalaciones sanitarias.

Datos de consumo

En los tableros eléctricos de la sección en estudio se encuentran instalados remarcadores de consumo energético para los sistemas de HVAC, Computación e Iluminación. La información se debe registrar de manera manual, este trabajo fue realizado por el Jefe de Planta Física del edificio, Dante Sarovic, quién entregó la información en una planilla Excel.

A pesar de contar con los registros de consumo final de energía de manera desagregada, para este caso de estudio se utiliza el total de electricidad consumida, es decir la suma de los tres sistemas que fueron medidos, esta decisión es tomada para emular lo que se estima como el nivel de detalle más frecuente a encontrar en edificios existentes, ya que información de consumos totales se puede obtener fácilmente desde las facturas de electricidad o medidores, sin incurrir en gastos extras en instrumentos de registro más específicos.

Por otro lado, la información desagregada disponible se utiliza para realizar un análisis de la precisión de los resultados simulados para cada consumo final. Los resultados de este análisis se encuentran en el Anexo II

El registro de consumos está disponible para el período Agosto-Diciembre del año 2012. La información para el resto de los meses se obtiene mediante el proceso de simulación del edificio. A continuación se muestra un gráfico con la información de consumos registrados

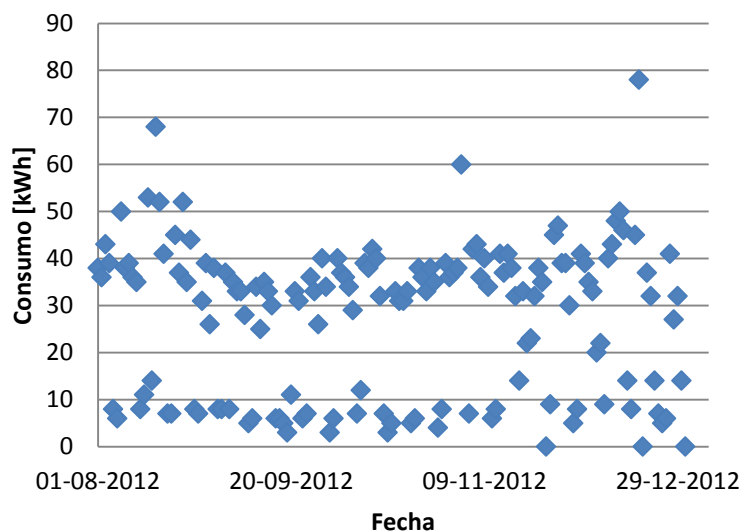


Figura 4-2: Datos de consumo obtenidos de remarcadores

Los tres valores por sobre los 60 kWh se deben a que corresponde al consumo de dos días, es decir, hubo tres días en que no se registró la información correspondiente, sin embargo, fue considerada al día siguiente como la suma de los dos días. El intervalo entre 20 y 60 [kWh] corresponde a los consumos durante los días laborales (lunes a viernes) mientras que el intervalo entre 0 y 20 [kWh] corresponde a los días del fin de semana.



Figura 4-3: Remarcadores de consumo eléctrico

Características de los sistemas instalados

La información respecto a los sistemas de iluminación, HVAC y equipos de computación está disponible y fue entregada para la realización de este caso de estudio, sin embargo la información no representaba las condiciones post-remodelación del año 2012, por lo tanto, para el proceso de calibración del modelo computacional, se realizó una visita a terreno para levantar la información necesaria. La información recolectada corresponde a ubicación, cantidad y potencia de los equipos pertenecientes a cada sistema. El inventario realizado en la visita se encuentra en el Anexo III.

Patrones de utilización

Los patrones de utilización de los diferentes sistemas y ocupación del edificio fueron identificados mediante visitas a terreno y entrevistas a los administradores y trabajadores del edificio. La información detallada se encuentra en el Anexo I.

Datos de Clima

Se cuenta con el archivo de clima entregado por el software de simulación utilizado, correspondiente a la ciudad de Santiago.

4.1.4 Descripción del edificio

El edificio fue construido a finales de los años 50 y está constituido por tres pisos, siendo el primero de ellos un subterráneo y los otros dos sobre el nivel de terreno. Su estructura es de muros de hormigón armado de 40 cm de espesor. Las losas del edificio también son de hormigón armado, de 35 cm de espesor. La división construcción, al encontrarse en el primer piso (sobre el nivel del suelo) no posee losas en contacto con terreno. La altura de losa a losa corresponde a 4,8 mt. (Ver *Figura 4-5*)

Como se mencionó, la división Construcción fue remodelada completamente durante el año 2012, las modificaciones más importantes a nivel de arquitectura corresponde a la creación de oficinas privadas mediante tabiquería divisorias de yeso cartón de 10 mm y vidrio en las caras frontales de estas. Además, se instaló cielo falso de yeso cartón a una altura de 3,8 mt desde el nivel de la losa.

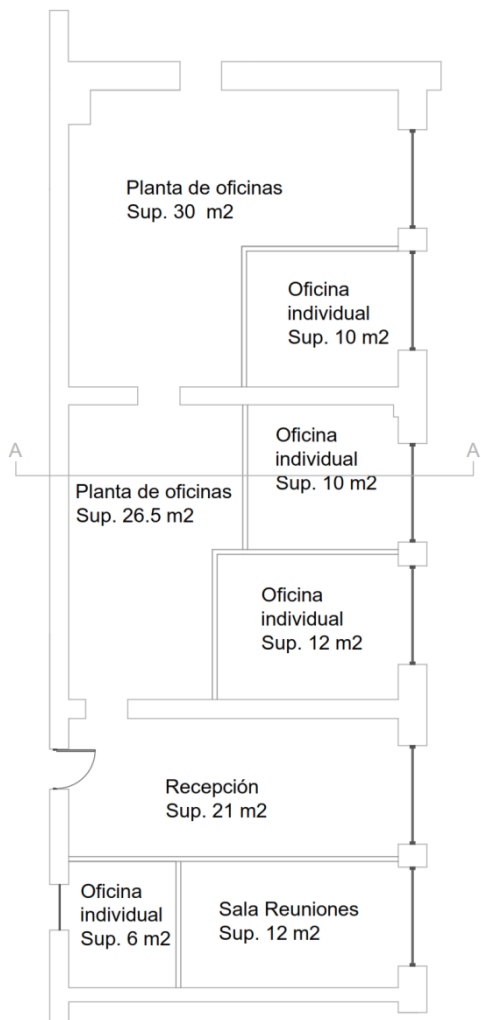
De las 4 caras perimetrales de la zona en estudio, 3 son cerramientos interiores mientras que la restante es parte de la envolvente del edificio. Esta última, posee gran porcentaje de ventanas, se ha calculado en aproximadamente un 65% de la superficie. Las ventanas están constituidas de cristal simple con marcos de acero. La orientación de estas es hacia el norte por lo tanto las ganancias solares son considerables a lo largo de todo el año. Ninguno de los cerramientos, tanto exteriores como interiores, cuenta con elementos de aislación térmica.

El acondicionamiento de los espacios se realiza mediante equipos FanCoil marca Anwo, los cuales se proveen de flujos de agua caliente y fría desde bombas de calor, también marca Anwo, instaladas en las afueras de las oficinas. El control de la temperatura interior está a cargo de los mismos trabajadores de la oficina, mediante la configuración de las unidades de FanCoil por medio de controles remotos. En la

Tabla 4-1 se muestran las características principales de los equipos. La ubicación de los equipos fue registrada durante la visita a terreno, en la *Figura 4-7* se muestra el esquema.

La iluminación de la oficina es 100% artificial. Los equipos instalados en todas las zonas corresponden a Tubos Fluorescentes T5 de alta eficiencia de 28W cada uno. Además debe considerarse el consumo del Ballast, el cual tiene una potencia de 32 W. Durante la visita a terreno se realizó un esquema de ubicación de los equipos de iluminación, el cual se observa en la *Figura 4-6*

Planta



Corte A-A

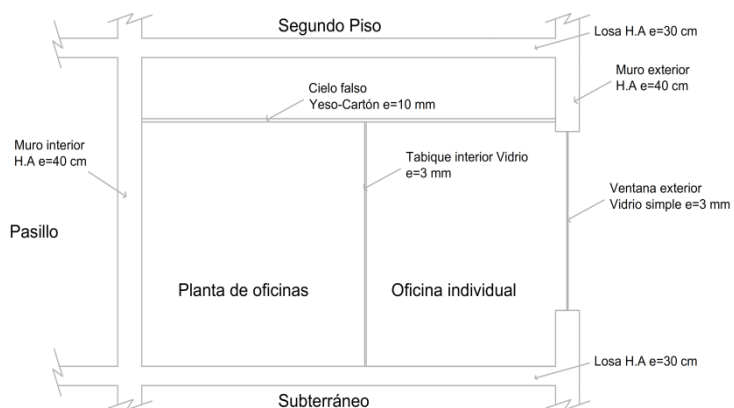


Figura 4-5: Corte de la zona en estudio

Figura 4-4: Planta de la zona en estudio

Tabla 4-1

Características de los equipos HVAC instalados

Marca/modelo	Anwo/MS-12HRDN1
Capacidad Calor/Frío	3530/3400 W
Refrigerante	R410A/980g
Consumo Calor/Frío	1040/1100 W
CoP Calor/frío	3,394/3,091
Consumo ventilador	24 Watts

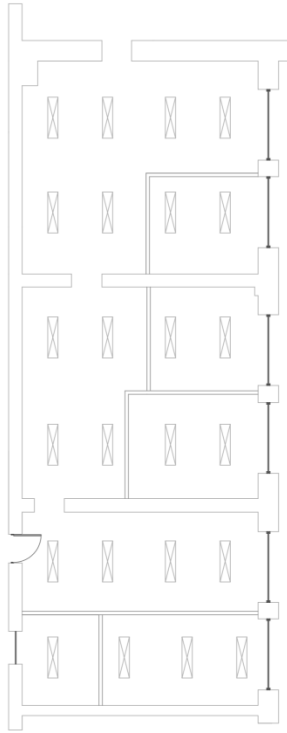


Figura 4-6: Planta de equipos de iluminación

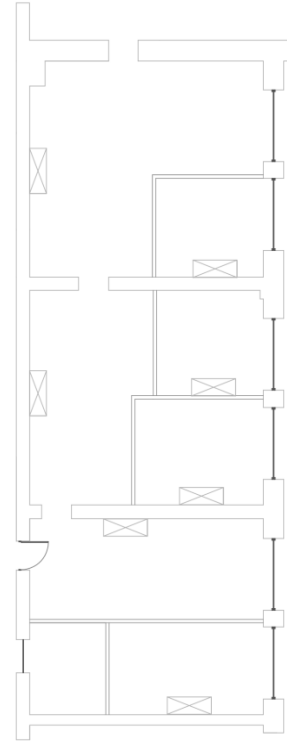


Figura 4-7: Planta de equipos de HVAC

En el exterior de la oficina se encuentra un patio interior en dónde existen diversos árboles que interfieren en la radiación solar recibida a través de las ventanas. Por otro lado, el edificio se encuentra ubicado al costado de la plaza Ercilla, en dónde también existen árboles de gran tamaño que contribuyen a disminuir la radiación incidente. A continuación, *Figura 4-8*, se muestra un esquema de ubicación y altura aproximada de los árboles.

Elementos como ascensores o sistemas de seguridad no están presentes al interior de las oficinas en estudio. Por otro lado, los equipos de comunicación, correspondientes telefonía IP marca Cisco, no consumen electricidad del tablero eléctrico de la zona en estudio.

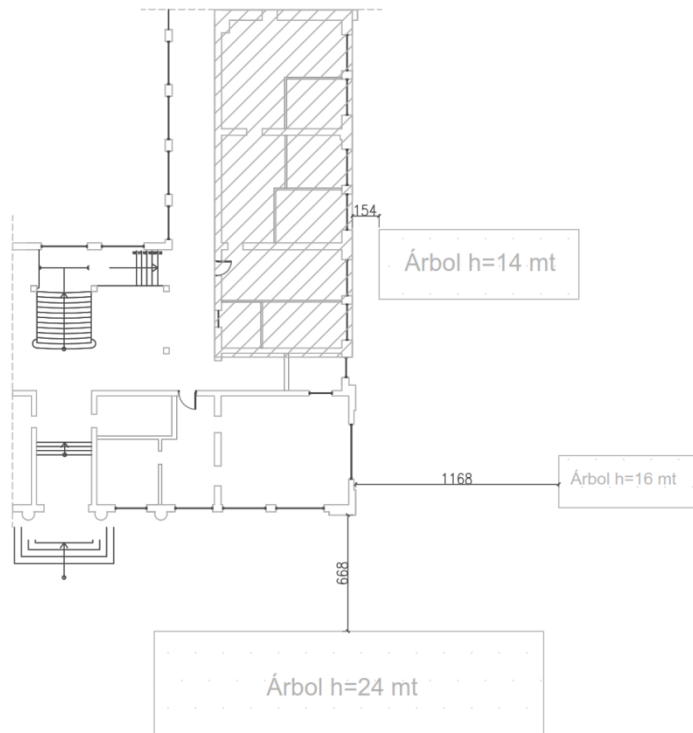


Figura 4-8: Esquema de ubicación de árboles al exterior de edificio

4.2 Desarrollo evaluación huella carbono

4.2.1 Objetivos y Alcance

La evaluación de Huella de Carbono a las oficinas en evaluación, correspondientes a la División Construcción de edificio IDIEM, considera los elementos de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC), iluminación y equipos de computación. Los cuales corresponden a todos los sistemas conectados al tablero eléctrico del cual se tiene información registrada de consumo.

El período de referencia del estudio se realizará considerando 50 años de operación del edificio.

Se evalúa solamente las emisiones relacionadas al consumo de electricidad, debido a que esta corresponde a la única fuente energética utilizada al interior de la zona en estudio.

4.2.2 Equivalente funcional

Tabla 4-2

Equivalente funcional

Tipo de edificio	Edificio de oficinas, 130 m ² de superficie útil
Uso	Superficie útil climatizada
Requisitos técnicos y funcionales relevantes	Climatización de espacios con un rango de temperatura entre 20°C y 26°C. Iluminación con equipos de eficiencia energética
Perfil de uso	27 personas, horario de trabajo desde 8.30 am hasta 6.30 pm, 5 días/semana, 52 semanas al año
Vida útil	50 años

4.2.3 Límites del sistema

La huella de carbono se calcula solamente para la etapa de *Uso de Energía Operacional* (ver *Figura 3-3*). Se considera toda la información relativa a las tres categorías de uso de energía; *Usos relacionados al edificio, Otros usos de relativos a sistemas integrados, Otros usos no relacionados con el edificio.*

Las oficinas en estudio se encuentran en la Región Metropolitana y son abastecidas de electricidad mediante el Sistema Interconectado Central.

4.2.4 Recolección de datos

El requerimiento principal para los datos es contar al menos con los consumos, de manera desagregada, correspondientes a un año de operación del edificio, en este caso se cuenta sólo con los consumos energéticos de 5 meses, por lo tanto se utiliza la opción de obtener los datos faltantes mediante una simulación energética de un modelo calibrado del edificio. El software utilizado corresponde a DesignBuilder®, el proceso de simulación y calibración se describe detalladamente en el Anexo I. En la, *Figura 4-9*, se muestran los resultados obtenidos de la simulación calibrada.

Si bien se cuenta con 5 meses de registro, se debe recordar que estos representan el total del consumo (revisar 4.1.3) por lo tanto no se pueden utilizar para el cálculo de emisiones, es por esto que la información a utilizar corresponde 100% a los datos simulados, lo cuales si están desagregados por consumo final.

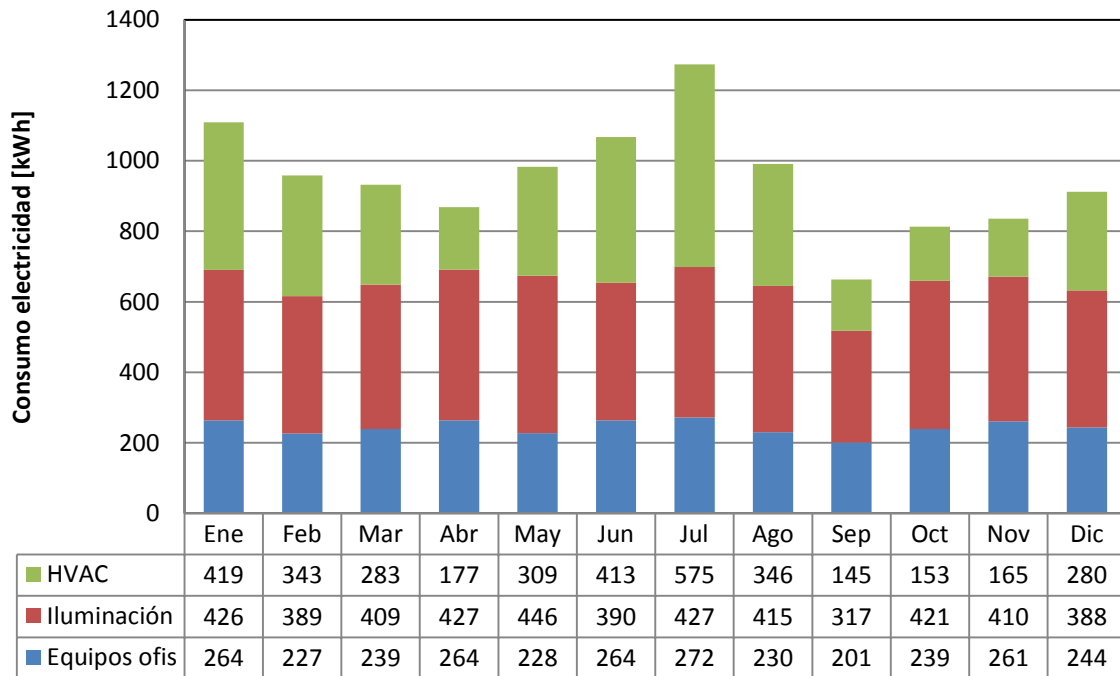


Figura 4-9: Consumos mensuales de energía a utilizar en el cálculo de emisiones GEI

El consumo anual de energía por cada sistema es

Tabla 4-3
Desglose de energía consumida, obtenida mediante la simulación energética

Sistema	Consumo [kWh]
Ganancias internas	2932
Iluminación	4867
HVAC	3609

A continuación, Tabla 4-4, se presenta el consumo anual de electricidad total y por unidad de área

Tabla 4-4
Resumen de consumos de electricidad en la zona en estudio

	Energía Total [kWh]	Energía por unidad de área [kWh/m ²]
Electricidad	11408	87,7

4.2.5 Evaluación de calidad de datos

Utilizando la definición los índices de calidad, se tienen los siguientes análisis cualitativos sobre la información simulada

- **Precisión:** Se considera que los resultados fueron bastante precisos debido a los buenos índices de calibración obtenidos. Además se ha utilizado información primaria para la calibración. El indicador es calificado como “bueno”
- **Integridad:** La información existente, 5 meses solamente, se considera escasa, por lo tanto este indicador es calificado como “Pobre”
- **Representatividad temporal:** La información es del año 2012, es decir tiene aproximadamente un año y medio de antigüedad a la fecha de este estudio, si bien cumple con los límites permitidos en la metodología, se cree que sería mejor que fuera aún más reciente, por lo tanto este indicador es calificado como “bueno”
- **Representatividad geográfica:** La información es específica del edificio por lo tanto la representatividad geográfica es “Muy buena”
- **Representatividad tecnológica:** El levantamiento de equipos realizado durante la visita al edificio permite asegurar que los datos son representativos de la tecnología utilizada en el edificio. Por lo tanto este índice es “Muy Bueno”

A continuación, Tabla 4-5, se muestra el valor asociado a cada índice

Tabla 4-5
Indicadores de calidad de datos para resultados de la simulación

Indicador	Calidad	Índice
Precisión	Bueno	1,1
Integridad	Pobre	1,2
Representatividad temporal	Bueno	1,1
Representatividad geográfica	Muy bueno	1,0
Representatividad tecnológica	Muy bueno	1,0

Con estos datos, se puede proceder a la evaluación de incertidumbre, la cual es realizada más adelante.

4.2.6 Cálculo de emisiones de GEI

Se tienen los siguientes consumos energéticos separados por categorías de uso

Tabla 4-6
Consumos energéticos por categoría de uso

Ítem	Usos relativo al edificio [kWh]	Otros usos no relacionados con el edificio [kWh]	Total [kWh]
Electricidad	8476	2932	11408

Luego, aplicando el factor de emisión para el cálculo del Impacto de Calentamiento Global

Tabla 4-7
Total de emisiones GEI edificio IDIEM en un año

Ítem	Unidad	Usos relativos al edificio	Otros usos no relacionados con el edificio	Total
Impacto de Calentamiento global	Kg CO ₂ eq.	3661	1267	4928

A lo largo de la vida útil del edificio, 50 años, el Impacto de Calentamiento Global corresponde a los presentados en la Tabla 4-8

Tabla 4-8
Total de emisiones GEI edificio IDIEM durante vida útil

Ítem	Unidad	Usos relativos al edificio	Otros usos no relacionados con el edificio	Total
Impacto de Calentamiento global [50 años]	Kg CO ₂ eq.	183050	63350	246400

4.2.7 Evaluación de incertidumbre

En base a los indicadores de calidad establecidos anteriormente, Tabla 4-5, se puede establecer la desviación estándar de los datos simulados, utilizando la siguiente ecuación

$$SD_{g95} \cong \sigma_g^2 = \exp^{\sqrt{(\ln(U_1))^2 + (\ln(U_2))^2 + (\ln(U_3))^2 + (\ln(U_4))^2 + (\ln(U_5))^2 + (\ln(U_b))^2)}$$

Lo que da como resultado

$$SD_{g95} \cong \sigma_g^2 = 1,26$$

Las implicancias y limitaciones de este resultado son discutidas en el *Capítulo 6: Discusión y Conclusiones*.

Capítulo 5. Guía de buenas prácticas

El objetivo de esta guía de buenas prácticas es entregar recomendaciones para la correcta medición de huella de carbono en edificios utilizando el enfoque de la metodología propuesta en este trabajo.

Se realiza una recopilación de las lecciones y aprendizajes obtenidos durante la definición de la metodología y su aplicación en el caso de estudio y se presentan en forma de recomendaciones para quién esté desarrollando la evaluación.

Por último, se debe destacar que en esta guía se da prioridad al proceso de obtención de datos mediante una simulación energética por sobre el resto de las etapas de la medición de huella de carbono. Por lo tanto, se recomienda la revisión de otros manuales y guías para lograr un acabado conocimiento del proceso completo.

5.1 Normas

Para la evaluación de huella de carbono utilizando la metodología propuesta en este trabajo, se recomienda estar familiarizados con las siguientes normas

- ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia
- ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices
- ISO 14067:2013 Huella de carbono de productos
- EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo.

5.2 Definición de objetivos de la medición de huella de carbono

Una de las etapas esenciales en el proceso de medición de huella de carbono corresponde a establecer los objetivos y el alcance del estudio a realizar. En base a estos, se determina gran parte de las características principales de las otras etapas. Algunos objetivos de realizar la medición de huella de carbono pueden ser

- Participación en programas de reporte de emisiones tanto voluntarios como obligatorios.
- Entrar a mercados, por ejemplo Europeos, en dónde existen exigencias de transparencia de carga medioambientales asociadas a los productos.
- Ayuda en la toma de decisiones en la etapa de diseño de un edificio

Dependiendo del objetivo que se desee cumplir con la evaluación de huella de carbono, las exigencias en cuanto a complejidad, alcance y precisión del estudio son diferentes. La forma de comunicar los resultados, el nivel de detalle y la necesidad o no de una revisión externa también depende de cada uno de los diferentes objetivos.

5.3 Definición del equivalente funcional

El equivalente funcional se define como una representación cuantificada de los requerimientos técnicos y/o funcionales de un edificio o un sistema, el cual es usado como base de comparación. Se debe establecer de acuerdo a los requerimientos establecidos en EN15804:2012, debe incluir el tipo de edificio, requerimientos técnicos y funcionales relevantes, patrón de uso y la vida de servicio. Además, si es necesario, se puede incluir otra información relevante en la definición. A continuación se presenta un ejemplo de equivalente funcional:

- *Tipo de edificio:* Edificio de Oficina; 3000 m² área de piso neta
- *Uso:* Área acondicionada a cierto nivel de temperatura específica
- *Requerimiento técnicos y funcionales relevantes:* Espacios calefaccionados y refrigerados a una temperatura entre 18°C y 25°C; renovación de aire a una tasa de 20m³/(h*persona); Iluminación de 250 lux.
- *Patrón de Uso:* 500 trabajadores; trabajando desde las 09.00 am hasta las 06.30pm, 5 días a la semana, 48 semanas al año
- *Vida de servicio de diseño:* 50 años

5.4 Límites del sistema

La metodología propuesta y por ende esta guía, está enfocada en la medición de la huella de carbono de la energía operacional del edificio.

Las normas internacionales establecen como requerimiento obligatorio separar la energía operacional del edificio en diferentes categorías. Como se menciona en la metodología, este requerimiento es una de las razones para proponer una simulación energética. Las diferentes categorías de uso de la energía son

- **Usos relacionados con el edificio:** Calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente sanitaria, iluminación y servicios auxiliares
- **Otros usos relativos a sistemas integrados:** Ascensores, persianas, seguridad, comunicaciones, etc.
- **Otros usos no relacionados con el edificio:** Ordenadores, neveras, máquinas, etc. relacionadas con la utilización del edificio

De estas 3 categorías, los estudios empíricos demuestran que la primera es la más influyente en los resultados, representando aproximadamente un 70% de la energía operacional total. Este hecho se traduce en que la mayor atención debe ser puesta en esta categoría, así también se traduce en que se debe invertir mayor cantidad de recursos para obtener información, preferentemente, primaria de todos los procesos asociados a esta categoría. Para esto, es necesario conocer muy bien los equipos instalados en cuanto a cantidad y potencia de cada unidad perteneciente a los distintos sistemas, también se debe identificar de manera precisa los encargados de su operación y patrones de utilización de cada uno de ellos.

Con respecto a las otras categorías, la importancia relativa de cada una depende en gran medida de la actividad realizada en el edificio. Si el edificio es no-residencial y el uso es de oficinas, probablemente la segunda categoría más importante sea *Otros usos no relacionados con el edificio*, en la cual sus componentes primordiales son el uso de computadores, impresoras y otros equipos propios de oficina. Al igual que antes, es muy importante conocer las características de dichos equipos y su patrón de utilización.

Para concluir, un análisis detallado de la categoría correspondiente a *Otros usos relativos a sistemas integrados* puede ser determinante en la precisión de los resultados, ya que si bien en porcentaje no es muy importante en cuanto al consumo, si se quiere lograr precisión, sobre todo a la hora de calibrar el modelo, la consideración adecuada de esta categoría puede tener un rol preponderante.

Para finalizar, se debe tener en cuenta el sistema eléctrico que abastece al edificio. En la metodología, se trabaja con el Sistema Interconectado Central, SIC. Si es que el objeto en evaluación se abastece de otro sistema, es necesario hacer los cambios correspondientes en los factores de emisión.

5.5 Recolección de datos

Si es que existen registros sobre los consumos energéticos del edificio, estos pueden ser usados para calcular la huella de carbono. Sin embargo, se debe asegurar que cuenta con el nivel de detalle suficiente, es decir que se presente de manera desglosada para cada categoría de uso y que abarquen al menos los 12 meses del año.

Si la información no está disponible, se debe evaluar cuál es la mejor opción para su obtención. En esta guía, siguiendo la metodología propuesta, se considera la obtención de información energética mediante una simulación del desempeño energético del edificio. La simulación se realiza mediante un modelo computacional el cual se calibra con los registros de consumo existentes, normalmente, facturas mensuales. A continuación, se realiza una descripción y se entregan sugerencias para este proceso

5.5.1 Obtención de datos mediante un modelo energético

5.5.1.1 Consideraciones generales

El desarrollo de una simulación energética puede ser útil cuando se presente alguno de estos casos

- Ausencia de información de consumo para los 12 meses del año
- Ausencia de información desagregada por cada categoría de uso o consumos de uso final
- En edificios dónde la medición/registro de consumos se haga de manera centralizada con otras dependencias y no se pueda obtener de manera directa los consumos de la zona en estudio

Además, es necesario tener presente que la simulación energética no es muy eficiente bajo ciertas condiciones, comúnmente, en la bibliografía pertinente, advierten que se pueden encontrar problemas al tratar de modelar edificios con las siguientes características

- Grandes Atrios
- Una fracción significativa bajo el suelo o adyacente a él (en sus muros).
- Envoltentes atípicas
- Condiciones de sombreado complejas
- Un gran número de zonas con distintos setpoints de temperaturas

A pesar de los problemas, hay que considerar que los programas de simulación cada vez tienen más capacidades y las geometrías complejas son cada vez más posibles de modelar. Por lo tanto la recomendación final es tener estas limitaciones en mente pero la decisión siempre debe pasar por la capacidad de quién esté a cargo de la modelación y el software a utilizar, el cual debe asegurar la generación de una simulación precisa y confiable, que permita tomar decisiones y obtener información certera sobre el comportamiento del edificio.

Algunas recomendaciones para lograr una correcta calibración del modelo y mantener una relación costo-calidad que sea razonable son:

- La simulación debe ser realizada por personas entrenadas que tengan experiencia tanto en el software a utilizar como en las técnicas de calibración
- Los *inputs* a utilizar deben representar de la mejor manera posible el actual comportamiento de los sistemas clave en el edificio

- Los *inputs* de la simulación deben ser ajustados para lograr que las demandas del edificio coincidan con los consumos registrados, por ejemplo en las facturas, con tolerancias aceptables. Es insuficiente demostrar que los consumos medidos y simulados son aproximados, hay que asegurar que el modelo prediga de manera bien ajustada el comportamiento energético del edificio.
- Se requiere una documentación cuidadosa de la información utilizada y de los resultados de la simulación

5.5.1.2 Proceso de simulación y calibración

I. Generación de un plan de una simulación calibrada:

En la primera etapa del plan es necesario definir una serie de variables, la primera de ellas da cuenta del nivel de complejidad del modelo a realizar y del nivel de precisión que se pretende lograr. Es normal partir con un nivel de precisión intermedio y si el modelo no queda bien calibrado se deberá aumentar la precisión o quizás cambiar el método.

Otra decisión importante a tomar es definir el software de simulación, algunas recomendaciones y requisitos para tomar la decisión son:

- Qué el programa esté disponible en el mercado, cuenta con soporte y está bien documentado
- Qué el programa tenga la capacidad de modelar adecuadamente el edificio y las estrategias de mejoras energéticas
- Qué el modelo pueda ser calibrado a un nivel de precisión aceptable
- Qué el programa permita usar archivos de clima con registros horarios

Además de esas consideraciones, a la hora de elegir el programa es recomendable tener en cuenta que sea un software reconocido, familiar para el evaluador y que su costo se justifique con los objetivos del estudio, es decir no pagar de más por módulo que no se utilizarán e invertir en los necesarios.

II. Levantamiento de información:

Se pueden identificar 8 categorías de información. A continuación se describe cada categoría y manera de obtener los datos

- i. **Registro de facturas energéticas:** Contienen información real y precisa sobre el uso energético del edificio en un determinado período. Considera todas las fuentes de energía y se pueden conseguir con el administrador del edificio. Entre más cuentas se encuentren disponibles, más certera puede llegar a resultar la calibración.
- ii. **Planos de arquitectura, mecánicos y eléctricos:** Normalmente incluyen la mayoría de la información necesaria para construir el modelo del edificio tales como geometría, sistemas de iluminación, sistemas mecánicos, ventanas y puertas, etc. A la vez que se obtengan estos planos hay que averiguar que representen la condición actual del edificio. Si los planos no se encuentran disponibles o no están actualizados es necesario realizar un levantamiento de arquitectura y sistemas instalados actuales.
- iii. **Datos observados en sitio:** Se refiere a la información obtenida a través de la observación mediante una o más visitas al edificio. Es importante recopilar datos de las condiciones en que opera el edificio y características de los equipos de los sistemas de HVAC, iluminación, equipos de oficina, etc. al interior del edificio. Los datos más relevantes a considerar es la potencia del equipo, las condiciones en que se utiliza y sus horarios.

Durante la visita es necesario registrar la mayor cantidad de información posible, se debe considerar las características de las ventanas, existencia o no de elementos de sombreado internos y externos. Por último se debe analizar las condiciones exteriores de edificio tales como existencias de jardines, árboles o edificios contiguos, dichas condiciones deben integrarse al modelo para mejores resultados.

- iv. **Monitoreo a corto plazo:** Consumos energéticos a través de intervalos de tiempo pequeños, por ejemplo, horarios. Estos datos se pueden lograr mediante la instalación de equipos de medición, los cuales pueden ser remarcadores de consumo energético que registren la información de manera automática en una base de datos o bien que requieran un registro visual en el intervalo de tiempo determinado por el evaluador.
- v. **Mediciones puntuales a equipos específicos:** Se realiza mediciones de uso de energía a equipos específicos, tales como bombas y ventiladores de los sistemas HVAC, iluminación, equipos de oficina, etc.
- vi. **Entrevistas:** Además de conocer los equipos instalados en el edificio, resulta clave entender como son operados, quienes están a cargo y el horario de ocupación.

Existen varias posibilidades de realizar este paso, puede ser a través de entrevistas a algunos trabajadores o encargados de operación. También se puede realizar encuestas virtuales (vía web) a cada uno de los trabajadores para así obtener información más precisa.

- vii. **Información de clima:** Para la calibración se requiere que los datos climáticos sean representativos del lugar. Normalmente se pueden descargar de internet o vienen incluidos en la base de datos de los programas de simulación. También se pueden obtener mediante softwares

Si existe información climática suficiente y se tienen las capacidades técnicas para desarrollar un archivo de clima correspondiente al año de evaluación se puede obtener un modelo energético mejor calibrado. Sin embargo, para predecir comportamiento futuro, es necesario utilizar archivo de climas que representen condiciones de clima promedio para la zona y no específicas de un solo año.

III. Creación del modelo inicial:

En términos generales, en la primera etapa de desarrollo del modelo se pueden hacer suposiciones ante la falta de información. Sin embargo para que el trabajo sea más eficiente, se recomienda trabajar con datos los más precisos posibles desde el primer modelo, para lo cual una visita al lugar es una muy buena fuente de información. A continuación se realiza una pequeña descripción y recomendaciones sobre los datos necesarios para el modelo.

- i. **Orientación:** Es necesario establecer de manera correcta la orientación en el modelo. Actualmente tener información de precisión aceptable acerca de la orientación es bastante sencilla y se puede realizar incluso mediante un Smartphone.
- ii. **Características envolvente del edificio:** Las características de la envolvente pueden ser obtenidas mediante los planos de arquitectura, pero también deben ser verificadas en terreno. Se debe asegurar que la envolvente está siendo modelada de manera adecuada debido a la relevancia que tiene en los resultados.
- iii. **Zonificación:** La creación de zonas termales depende fuertemente del criterio de quién esté realizando la simulación y del nivel de precisión que se quiera lograr. En el caso de los edificios existentes, a la hora de definir las zonas termales es muy importante revisar la actividad que se realiza en la zona, los sistemas de iluminación y por supuesto los sistemas HVAC. En una primera etapa la zonificación se puede establecer de acuerdo a los planos disponibles, pero para la calibración es altamente recomendable una visita al edificio para corroborar la zonificación realizada.
- iv. **Puertas y ventanas:** En el modelo se debe tener especial atención con las ventanas ya que las características de estas son muy influyentes en los resultados. Se debe asegurar que la información entregada al modelo sea precisa en cuanto a la posición y tamaño de estas, así como también las características del vidrio y la

materialidad del marco. Por último, se debe tomar atención a los elementos de sombreado que pueda poseer la ventana. Con las puertas hay que tener las mismas atenciones. Para ambos objetos conviene primero analizar las opciones que el software permite ingresar sobre las propiedades de cada uno.

- v. **Sistemas de HVAC y patrones de uso:** Dependiendo el programa de simulación usada, se pueden incluir con mayor o menor detalle las propiedades de los sistemas HVAC. Se debe procurar que el programa utilizado pueda, al menos de manera aceptable, representar el comportamiento de estos sistemas. Se debe entender acabadamente el tipo de sistemas de HVAC que se está utilizando en cada zona, conocer su potencia de calor y de frío y los consumos energéticos de cada unidad del sistema. En la etapa inicial de la modelación se pueden hacer algunas suposiciones, pero para obtener la simulación calibrada es recomendable reducir al máximo las suposiciones y utilizar información obtenida de la visita y estudio del sistema.
- vi. **Características y patrones de uso de iluminación:** Esta información es sencilla de incorporar en los modelos, normalmente se puede hacer detallando la cantidad de equipos y su potencia o mediante un valor de potencia por unidad de área. Se debe asegurar incorporar un patrón de uso representativo.
- vii. **Otros equipos instalados:** Esta categoría depende de la utilización del edificio, si es edificio residencial, los equipos más importantes son los electrodomésticos. Si es un edificio no residencial, los equipos dependen del tipo de actividad por ejemplo si es un edificio de oficinas, los equipos a considerar son mayormente computadores, impresoras entre otros.
- viii. **Ocupación:** La ocupación hace referencia a cuantas personas trabajan en el edificio. Además de la cantidad de personas es muy importante conocer cuáles son los horarios de ocupación. Se recomienda que para obtener información certera se realizan entrevistas a los trabajadores, ejemplos de aspectos a identificar corresponden a los horarios de llegada, almuerzo y salida. Otra información relevante son los horarios de apertura, aseo y cierre del edificio.

IV. Calibración del modelo:

Dependiendo el nivel de detalle que se quiera lograr y la información disponible se pueden utilizar 3 enfoques distintos

- a. Comparaciones de uso mensuales del modelo con facturas de consumo mensual del edificio
- b. Comparaciones a nivel de consumo energético desagregado para cada sistema instalado.

c. Comparación de uso horaria del modelo con mediciones horarias del edificio.

Para indicar el nivel de precisión de la calibración, se utilizan los índices CV(RMSE) y NMBE. Las fórmulas correspondientes son

$$CV(RMSE) = 100 * \frac{\left(\frac{\sum(y_i - \hat{y})^2}{n - p}\right)^{\frac{1}{2}}}{\bar{y}}$$

$$NMBE = 100 * \sum(y_i - \hat{y}_i) / ((n - p) * \bar{y})$$

En dónde

- y_i = Valores de energía medida
- \hat{y} = Valores de energía simulados
- \bar{y} = Promedio aritmético de energía medida
- n = número de datos
- p = número de modelo, para este caso 1

Comúnmente se calibra con datos mensuales de consumo, ya que son los más accesibles. Los datos horarios necesitan mayor cantidad de recursos para ser obtenidos. Dependiendo el tipo de calibración a realizar, se utilizan las siguientes tolerancias para determinar si el modelo está o no calibrado, las cuales dependen del estándar a utilizar.

Tabla 5-1
Índices de tolerancia para la calibración en diferentes estándares.

	ASHRAE 14	FEMP	IPMVP
$CVRMSE_{Month}$	±5%	±5%	±10%
$NMBE_{Month}$	±15%	±20%	±15%
$CVRMSE_{Hour}$	±10%		
$NMBE_{Hour}$	±30%		

Si al comparar los resultados obtenidos de la simulación con la información de consumos medida no se cumple con las tolerancias de calibración establecidas, se debe ajustar el modelo y hacer nuevamente las comparaciones pertinentes.

Para lograr mejorar los resultados del modelo, se recomienda una nueva visita a terreno, en dónde se recomienda poner atención en las siguientes características

- Levantamiento de equipos instalados: Verificar tanto la cantidad como las características de cada componente de los distintos sistemas instalados en el edificio.
- Entrevistar a los encargados de cada sistema instalado: Revisar en conjunto a los encargados de cada sistema, los inputs utilizados en el modelo.
- Horarios de operación: Verificar, mediante observación o nuevamente entrevistas, que los horarios de operación y ocupación del edificio utilizados en la simulación sean representativos del edificio.
- Condiciones especiales: Cualquier condición al interior del edificio que no se había considerado en la primera etapa, tanto al interior como al exterior y que puedan afectar el comportamiento energético.

Además de la visita a terreno, se debe revisar el modelo para eliminar la posibilidad de que existan errores cometidos por el modelador.

Si los ajustes no dan resultado, se recomienda repasar las suposiciones o simplificaciones hechas ya que quizás no han sido acertadas y no permiten la calibración. Por último se debe revisar los datos medidos de consumo, asegurar que sean confiables y hayan sido bien registrados. Una evaluación de incertidumbre es recomendable para ese paso.

5.6 Cálculo de huella

Una vez que se ha obtenido la información de consumos energéticos, esta debe ser clasificada al menos por categoría de uso, pero también se puede diferenciar por consumo de uso final y cualquier otra manera que los evaluadores consideren pertinente y facilite la toma de decisiones.

Clasificada la energía utilizada, se procede al cálculo de emisiones, para lo cual se debe multiplicar el consumo por el factor asociado al sistema energético que provee al edificio, en este caso corresponde al sistema interconectado central, SIC y su factor es

$$F.E_{SIC} = 0,432 \frac{tCO_2}{MWh}$$

Además, existe la opción de presentar los resultados de emisiones de manera normalizada para una futura comparación de estos resultados con los asociados a otras categorías de impacto. El factor de normalización a utilizar corresponde a

$$F.N (PCG) = 8.7 \text{ ton CO}_2\text{-eq./cápita/año}$$

5.7 Evaluación calidad de datos e incertidumbre

El enfoque de evaluación de calidad de datos e incertidumbre realizado en el presente trabajo no ha demostrado ser el más adecuado para el caso de la cálculo de huella de carbono en edificios existentes, debido a esto no se puede realizar recomendaciones para el proceso. Las razones de esto son expuestas en el Capítulo 6.

5.8 Otras lecturas recomendadas

Para complementar la información entregada en esta guía, se recomienda la lectura de los siguientes documentos

- Greenhouse gas protocol – Product life cycle accounting and reporting standard[29]
- PAS 2050:2008 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.[49]
- EeBGuide Guidance Document, Part B: BUILDINGS, Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative.[25]
- EeBGuide: Guía operativa para estudios de Análisis de Ciclo de Vida en la iniciativa de edificios energéticamente eficientes (Materiales de formación)[24]
- GHG Protocol: Uncertainty calculation tool[30]

Además, para la simulación energética se recomienda la revisión de los siguientes estándares internacionales sobre medición de consumo en edificios existentes, donde se incluye la opción de modelación.

- ASHRAE GUIDELINE 14: Measurement of Energy and Demand Savings [6]
- Federal Energy Management Program, Guideline [29]
- International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP®) [33]

Capítulo 6. Discusión y Conclusiones

Durante las últimas décadas, la medición de gases efecto invernadero asociado a las diversas actividades humanas ha cobrado gran relevancia a nivel mundial y uno de los principales motivadores de este fenómeno es la evidencia existente acerca de los impactos que generan estos gases en el comportamiento climático, el cual se ha vuelto más adverso en el último tiempo. El medir, controlar y reducir las emisiones relacionadas a las actividades antropogénicas es un desafío transversal para la sociedad, ya que es necesario actuar a nivel país, organizacional e incluso personal.

Con los antecedentes revisados al comienzo de la investigación, se deja en claro la necesidad que se tiene a nivel nacional de avanzar en el desarrollo de estándares y metodologías que permitan, e incentiven, la medición y reducción de huella de carbono, necesidad que se manifiesta en los compromisos de reducción de emisiones de CO₂ y consumo energético que ha firmado Chile. Se cree que en el proceso de generación de estrategias y programas, es conveniente considerar la experiencia de la Unión Europea debido a su gran nivel de desarrollo en el tema.

La metodología propuesta en este trabajo, fue desarrollada en base a las normas y estándares de mayor relevancia internacional, utilizando conceptos y definiendo requerimientos de acuerdo a los actuales avances en la medición de huella de carbono de edificios. A pesar de considerar solamente una etapa del ciclo de vida, se ha dejado establecida la base para la incorporación de otras etapas y categorías de impacto.

Se considera que al proponer un enfoque de simulación energética del edificio, se logró generar una metodología que es aplicable a una gran cantidad de tipos de edificios, ya que las capacidades actuales de los softwares de modelación logran sortear de forma adecuada la diversidad de las construcciones, tales como geometría, materialidad, utilización, equipos instalados entre otros. Además, cada año las potencialidades de los softwares son mayores y las limitaciones se van reduciendo, permitiendo la modelación de una mayor cantidad de geometrías y propiedades de las construcciones, al mismo tiempo que los resultados adquieren mayor confiabilidad.

Con la aplicación de la metodología, se pudo comprobar que ante la ausencia de mediciones de consumo de energía y/o desglose en su uso final, la utilización de un modelo calibrado como fuente de información es una alternativa eficiente, que permite suplir dichos vacíos en menor tiempo que si hubiese que obtener la información mediante mediciones. Los índices de tolerancia de la calibración obtenidos en el caso de estudio están muy por debajo de los máximos permitidos, con lo cual se puede asegurar que se logró una muy buena correspondencia entre el modelo y la realidad, lo cual, a priori, permite asegurar confiabilidad en los datos simulados de los meses sin mediciones. A futuro, este análisis se podría completar con la comparación de los resultados simulados con los registrados en algunos meses posteriores.

La información de consumos energéticos disponibles para la oficina evaluada, se encontraba de manera desglosada para los distintos sistemas instalados, específicamente, en iluminación, equipos de oficina y fuerza (HVAC). Si bien en el caso de estudio se utilizó solamente el total de energía, esto para poder hacer válido la utilización de la metodología, de manera paralela se realizó el análisis de cómo se ajustaban los consumos de uso final simulados con los medidos. Los gráficos se presentan en el capítulo de anexos y en ellos se observa que a medida que se calibra el modelo, se ajustan de mejor manera los resultados de cada sistema, es así, que para el final del proceso de calibración los índices de tolerancia se cumplían tanto a nivel total como a nivel de uso final. Estos resultados son alentadores en cuanto a la efectividad de la simulación como fuente de información de consumos de uso final, sin embargo, se debe ser cauteloso y se cree que es necesaria la realización de más casos de estudios de este tipo para poder identificar si este resultado es normal y con qué grado de confianza.

Si bien los resultados de la modelación se ajustaron correctamente a los medidos en el edificio, hay una serie de consideraciones que se deben tener en cuenta en el “éxito” logrado, uno de las más relevantes corresponde al hecho que la solución entregada por medio de la simulación calibrada no es única, es decir, hay una serie de configuraciones de utilización de energía, por parte de los distintos sistemas instalados, que pueden conducir al mismo consumo total. Si bien este problema se puede reducir mediante la calibración a nivel de los consumos de uso final, esta solución también es parcial, ya que por naturaleza, la calibración energética es un problema que está sobre-especificado, es decir con muchos inputs, y sub-determinado, esto último debido a que se cuenta con muy pocos puntos de validación. Esta condición se traduce en que sin importar si se trabaja con totales o con consumos de uso final, la solución entregada no será única. Para subsanar este problema se deben hacer mediciones a una mayor cantidad de parámetros para contar con más de puntos de validación, lo cual puede ser costoso en términos de dinero y tiempo. Sin embargo, una manera de sobrellevar este problema sin invertir tantos recursos, es la identificación de parámetros claves del modelo, los cuales deben ajustarse a los objetivos y alcance del estudio. Por ejemplo, para el caso de estudio realizado, el resultado más importante es el consumo energético, por lo tanto se definió como parámetros clave la potencia de cada equipo y sus patrones de utilización.

Uno de los aspectos de la metodología que no entregó resultados satisfactorios corresponde al enfoque utilizado para la evaluación de calidad de datos y análisis de incertidumbre. Si bien se cree que la elección de un método cualitativo es correcta, debido a que no se trabaja con muestras de datos que permitan un análisis estadístico, es necesario que los indicadores de calidad y la matriz pedigree a utilizar sean ajustados para el caso de una simulación energética como fuente de información. La principal falencia encontrada fue la incapacidad de establecer de forma apropiada la relación entre la cantidad de datos disponibles para la calibración (ej. Cantidad de Facturas) y la confiabilidad de los datos obtenidos mediante simulación, es decir, la dependencia existente entre la certeza de los datos simulados en función de cuantos meses disponibles se tiene para la calibración.

En cuanto a los resultados de la huella de carbono, para una mejor interpretación, se presentan los porcentajes de participación de consumo de energía, los cuales son idénticos en términos de emisiones de GEI

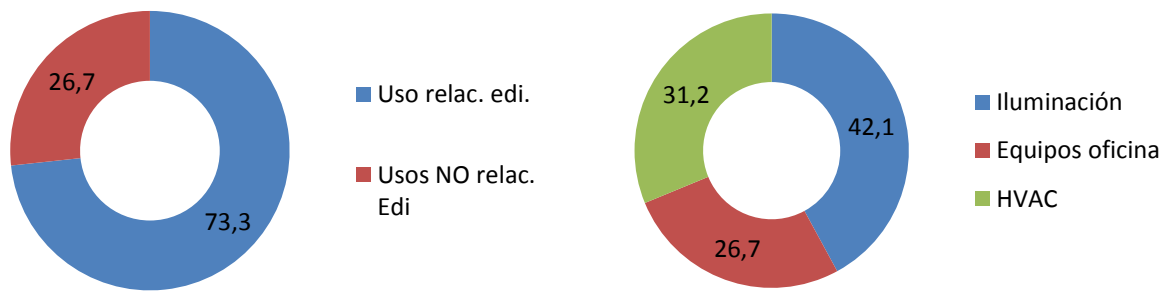


Figura 6-1: Porcentajes de participación de emisiones de GEI por categoría y uso final de la energía para el caso de estudio

De los gráficos, se observa que la mayor energía es consumida por los sistemas de *usos relacionados al edificio*. Se puede conseguir la disminución de estos consumos realizando intervenciones tanto a nivel de equipos instalados, por ejemplo mejora de eficiencia en equipos de iluminación y HVAC, y también se pueden realizar mejoras a nivel de envolvente, por ejemplo aumentando el nivel de aislación para reducir el consumo en sistemas de HVAC o permitiendo un mayor ingreso de luz natural para reducir los consumos en los sistemas de iluminación. Más allá de las posibles estrategias de reducción, lo cual se aleja del alcance de este trabajo, es interesante destacar que mediante el cálculo de consumos de manera desagregada para cada uso final, se logra una evaluación mucho más certera de la situación actual, lo cual ayuda a realizar un mejor análisis de estrategias costo-efectivas de eficiencia energética.

Con el desarrollo de la metodología y su posterior aplicación en un caso de estudio, se logró identificar aspectos claves que luego fueron transformados en una serie de recomendaciones en la guía de buenas prácticas. La guía no pretende ser un manual completo sobre la medición de huella de carbono, sino que reforzar algunas etapas claves y especialmente, el proceso de obtención de datos mediante la simulación energética.

El trabajo futuro en cuanto a la medición de huella de carbono en edificios, es extenso, esta investigación propone una metodología inicial, que considera sólo uno de las etapas del ciclo de vida del edificio, a futuro esto se debería complementar con el resto de las etapas relevantes para edificios existentes y así poder lograr una metodología conducente a una Declaración Ambiental de Producto, para lo cual, además de considerar el resto de las etapas del ciclo de vida se deben considerar las otras categorías de impacto.

Una de las tareas pendientes a nivel nacional, es establecer factores de emisión de las diferentes fuentes de energía, calculados mediante un análisis de ciclo de vida. Este desarrollo permitiría una estimación más acertada de la cantidad de emisiones de GEI relacionadas no sólo a los edificios, sino que a todos los sectores.

En cuanto a la simulación como fuente de información de consumo de energía, a futuro se debiese profundizar en el desarrollo de un enfoque de evaluación de calidad de datos y análisis de incertidumbre que permita establecer con mayor certeza el grado de confiabilidad de los datos simulados dependiendo del proceso, o de la información disponible, para la calibración.

Para finalizar, se cree que la metodología propuesta, en conjunto con la guía de buenas prácticas, es un avance real en materia de medición de huella de carbono en edificios existentes, y que soluciona de manera efectiva un problema recurrente en este tipo de evaluación, la falta de información. Con la inclusión de las otras etapas del ciclo de vida se puede dar un paso importante en la reducción de huella de carbono relacionada a los edificios, cumpliendo así con la motivación inicial de este trabajo, ser un esfuerzo más en la disputa en contra el cambio climático.

Bibliografía

- [1] A. Pedrini, F. W. (2002). A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. *Building and Environment* 37 , 903-912.
- [2] Aashish Sharma, A. S. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 , 871-875.
- [3] ambiente, M. d. (20011). *Evaluación de Medio Término 2011. OECD Environmental Performance Review, Chile 2005* .
- [4] Antón, V. M. (2004). *Metodología del análisis del ciclo de vida*.
- [5] Antti Säynäjoki, J. H. (2011). Carbon Footprint Assessment of a Residential Development Project. *International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 2, No. 2*.
- [6] ASHRAE. (2002). *ASHRAE GUIDELINE 14: Measurement of Energy and Demand Savings*.
- [7] ASHRAE. (2011). *ASHRAE HANDBOOK: HVAC Applications*.
- [8] Athena sustainable materials institute. (2013). *A Grander View The Enermodal Engineering Office Building Kitchener, ON. An Environmental Building Declaration According to EN 15978 Standard*.
- [9] Barrio, A. A. (s.f.). *Sostenibilidad en la construcción. Normalización*.
- [10] BSI. (2006). *Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework*.
- [11] BSI. (2006). *ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia* .
- [12] BSI. (2006). *ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices*.
- [13] BSI. (2006). *ISO 14064 Gases de efecto invernadero*.
- [14] BSI. (2010). *ISO 14025:2006 Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos*.
- [15] BSI. (2012). *EN 15804:2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto*.
- [16] BSI. (2012). *EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios*. .
- [17] BSI. (2013). *ISO 14067 Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for a quantification and communication*.
- [18] CDM. (2010). *Tool to calculate the emission factor for an electricity system*.
- [19] CONAMA. (s.f.). *Guía metodologica para la estimación de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*.
- [20] Chris Scheuer, G. A. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings* 35 , 1049-1064.
- [21] Daniel Coakley, P. R. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (2014), 123-141.
- [22] Danish ministry of the environment. (2005). *Impact categories, normalisation and weighting in LCA*.
- [23] EEA, European Environment Agency. (2013). *European Union CO2 emissions: different accounting perspectives*.
- [24] EeBGuide. (2012). *EeBGuide Guidance Document, Part B: Buildings*.

- [25] EeBGuide. (2012). *Guía operativa para estudios de Análisis de Ciclo de Vida en la iniciativa de edificios energéticamente eficientes*.
- [26] EeBguide. (2013). *EeBGuide Guidance Documente Part B. Buildings*.
- [27] Endong Wang, Z. S. (2012). *hybrid Data Quality Indicator and statistical method for improving uncertainty analysis in LCA of complex system e application to the whole-building embodied energy analysis*.
- [28] EPA. (1995). *Guideines for Assessing the quality of Life-Cycle Inventory Analysis*.
- [29] GHG Protocol. (s.f.). *GHG Protocol guidance on uncertainty assessment in GHG inventories and calculating statistical parameter uncertainty*.
- [30] GHG Protocol. (s.f.). *Quantitative Inventory Uncertainty*.
- [31] Greenhouse Gas Protocol. (2012). *Product Life Cycle accounting and Reporting Standard*.
- [32] Guido W. Sonnemann, M. S. (2003). Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. *Journal of Cleaner Production 11*, 279-292.
- [33] Hensen, J. L. (2010). *Building Performance Simulation for Sustainable Buildings*.
- [34] I. Sartori, A. H. (2006). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 249-257.
- [35] Ignacio Zabalza Bribián, A. A. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification.
- [36] Ihobe. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono*.
- [37] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*.
- [38] IPCC Working Group III-Mitigation of Climate Change. (2013). *Chapter 9. Buildings*.
- [39] Jeff S. Haberl, C. C. (s.f.). ASHRAE's GUIDELINE 14-2002 FOR MEASUREMENT OF ENERGY AND DEMAND SAVINGS: HOW TO DETERMINE WHAT WAS REALLY SAVED BY THE RETROFIT. .
- [40] Jong-Ho Yoon, E.-J. L. (2012). Calibration Procedure of Energy Performance Simulation Model for a Commercial Building.
- [41] Jonsson, A. (2000). Tools and methods for environmental assessment of building products methodological analysis of six selected approaches. *Building and Environment 35*, 223-238.
- [42] Luis F.Cabeza, L. R. (2013). Life cycleassessment(LCA)andlifecycleenergyanalysis(LCEA) of buildingsandthebuildingsector:Areview.
- [43] Marka Huijbregts, W. A. (2003). *Evaluating Uncertainty in Environmental Life-Cycle Assessment. A Case Study Comparing Two Insulation Options for a Dutch One-Family Dwelling*.
- [44] Martin Erlandsson, M. B. (2003). Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. *Building and Environment 38*, 919-938.
- [45] MMA, Ministerio Medio Ambiente. (2012). *Estrategia Construcción Sustentable*.
- [46] Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. MINVU. (2006). *Manual de Aplicación- Reglamentación térmica*.
- [47] Oscar Ortiz, F. C. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials 23*, 28-39.

- [48] Oyeshola F. Kofowoeola, S. H. (2009). Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. *Energy and Buildings* 41 , 1076-1083.
- [49] PAS 2050. (2008). *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*.
- [50] Profiles, B. E. (2013). *Product Category Rules for Type III environmental products declaration of construction products to EN 15804:2012*.
- [51] Reddy TA, A. K. (2002). An evaluation of classical steady-state off-line linear parameter estimation methods applied to chiller performance data. HVAC&R.
- [52] SAIC. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice* .
- [53] Saltelli, A. R. (2008). Global sensitivity analysis: the primer. En ISBN: 978-0-470-05997-5.
- [54] Sten de Wit, G. A. (2002). Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings* 34, 951-958.
- [55] Sugiyama, H., Fukushima, Y., Hirao, M., Hellweg, S., & Hungerbühler, K. (2005). *Using Standard Statistics to Consider Uncertainty in Industry-Based*.
- [56] T. Ramesh, R. P. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 1592-1600.
- [57] UNFCCC/CCNUCC. (2007). Tool to calculate the emission factor for an electricity system V.02.
- [58] William O. Collinge, A. E. (2013). Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. *Buildings and Building Materials*, 538-552.
- [59] Yang, G. (2012). *Energy Simulation in Existing Buildings: Calibrating the Model for Retrofit Studies*.
- [60] Yiqun Pan, Z. H. (2012). The Application of Building Energy Simulation And Calibration in Two High-Rise Commercial Buildings in Shanghai.

Anexo I. Proceso de simulación y calibración del modelo

I.1. Generación del plan de simulación calibrada

i. Objetivo

La simulación de las oficinas se realiza con el objetivo de obtener información de consumos energéticos relacionados a la operación de estas. Se busca representar de la manera más precisa posible las condiciones actuales del edificio considerando los equipos instalados, la ocupación y los patrones de utilización.

ii. Programa de simulación

El programa de simulación corresponde a DesignBuilder v3.4, el cual fue adquirido en su versión estudiantil para el desarrollo de esta investigación. Hay que destacar que el programa seleccionado cumple con el requerimiento de poder simular 8760 horas, un año, del edificio en estudio.

iii. Calibración

La calibración se realizará de manera mensual, ya que no se cuenta con información horaria de los consumos del edificio. Por otro lado, la información obtenida in situ abarca solamente 5 meses durante el año 2012.

iv. Tolerancias de calibración

Se debe cumplir con los siguientes índices

Tabla I-1
Índices de calibración según ASHRAE 14

INDICE	ASHRAE
	14
ERR _{month}	± 5 %
ERR _{year}	---
CV(RMSE _{month})	± 15 %

ERR: Mean bias error

CV(RMSE): Coefficient of variation of the root mean squared error

I.2 Levantamiento de información

La información que estaba disponible y aquella que se obtuvo mediante visitas a terrenos es descrita en la sección 4.1.3. A lo largo de este capítulo la información es mostrada a medida que es utilizada en el proceso de obtención de datos.

I.3 Creación del modelo inicial

Una vez generada la información en 2-D (en a visita al edificio) se realiza el modelo en DesignBuilder, el cual tiene una interfaz tridimensional para la generación de modelos. A continuación, *Figura I-1*, se muestra una imagen de la oficina realizada en el software

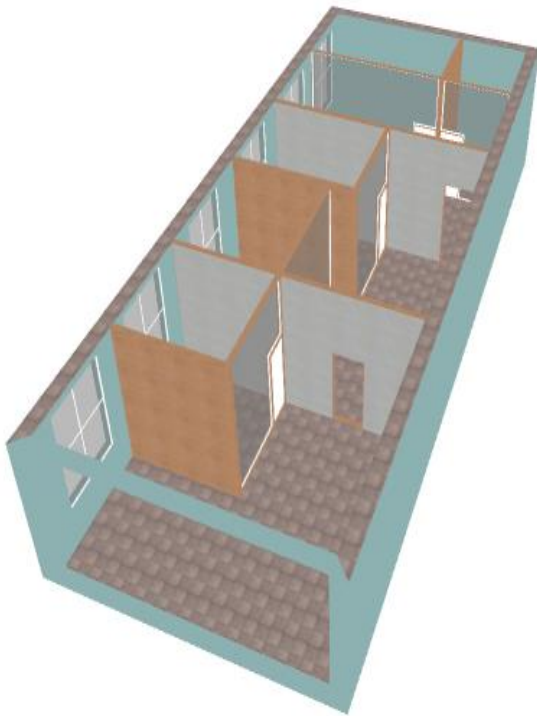


Figura I-1: Modelo en DesignBuilder de las oficinas a evaluar

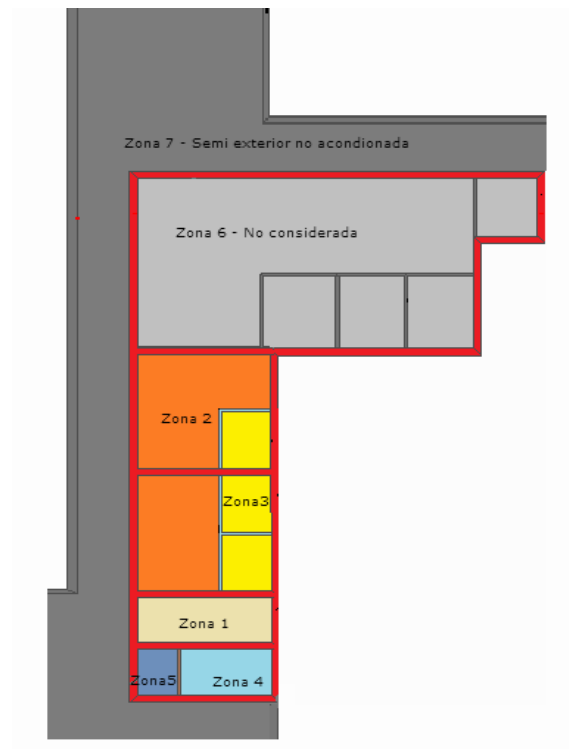


Figura I-2: Zonificación realizada en el caso de estudio

Una vez realizada la estructura del modelo, es importante definir una zonificación de cada espacio dependiendo de su tipo de uso y sistema de HVAC. En la *Figura I-2* se muestra la zonificación realizada para el caso de estudio. Además, a continuación, Tabla I-2, se presenta un resumen de cada zona y sus características

Tabla I-2
Detalle de las zonas definidas en la modelación

Nombre	Utilización	Área [m2]	HVAC	Setpoint temp. °C
Zona 1	Recepción	21	FanCoil	R:24/C:22
Zona 2	Planta de oficina	56,5	FanCoil	R:24/C:22
Zona 3	Oficina privada	32	FanCoil	R:24/C:22
Zona 4	Sala Reuniones	12	FanCoil	R:24/C:22
Zona 5	Oficina privada	6	Solo calefactor	C:22

Realizada la zonificación, se procede a especificar la materialidad del edificio. Para las propiedades térmicas de los materiales se utiliza los valores entregados en la Reglamentación Térmica Chilena[46]

Los muros estructurales del edificio están contruidos en hormigón armado, cubiertos con una capa de estuco a ambos lados. El espesor de los muros es de 40 cm (ver *Figura I-3*). Las losas también son de Hormigón armado con un espesor de 30 cm (incluye sobrelosa y pavimento). El cielo de las oficinas corresponde a cielo falso de yeso cartón de 10 mm, el cual está instalado a una altura de 3,8 mt, medido desde el pavimento. El espacio de aire entre el cielo falso y la losa superior es de 1 metro de espesor.

Los tabiques interiores, divisorios entre las oficina, tienen un espesor de 10 cm y están constituidos de planchas de Yeso Cartón de 10 mm soportados con estructura de volcometal. Además, la cara frontal de las oficinas es de vidrio de 3 mm de espesor. La estructura soportante corresponde a marcos de aluminio.

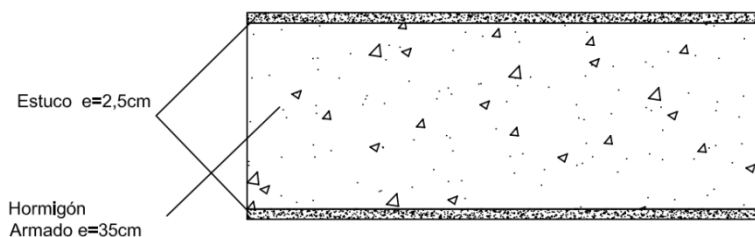


Figura I-3: Materialidad muro estructural edificio IDIEM

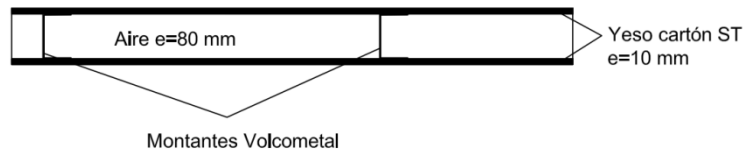


Figura I-4:Materialidad tabique divisor en las oficinas en estudio

A continuación, Tabla I-3, se muestra una resumen con la materialidad de cada muro y tabique y su respectiva transmitancia térmica calculada en el Software de simulación (U)

Tabla I-3
Materialidad de los elementos constructivos

Elemento	Zonas	Capas	U [W/m ² -K]
Muros	1,2,3,4,5	Estuco (2cm)- Hormigón armado (35 cm)-Estuco (2 cm)	2,27
Losas	1,2,3,4,5	Hormigón armado 30 cm	2,20
Tabique vidrio	3	Vidrio 3 mm con marcos de aluminio	5,89
Tabique divisor	3,5	Yeso cartón 10mm- Aire 80 mm-Yeso cartón 10mm	2,05

Las oficinas solo poseen ventanas exteriores, las cuales corresponden a vidrio simple de 3 mm con marco y divisores de acero de 3mm de espesor y 50 mm de ancho. Hay dos divisores horizontales y dos verticales en cada ventana

Tabla I-4
Detalle de ventanas

Zona	Tipo	Vidrio	Marco	SHGC vidrio	U vidrio [W/m ² - K]	U acero [W/m ² -K]
1,2,3,4	Ventana exterior	Vidrio 3 mm	Métalico 3mm espesor, 50 mm ancho	0,861	5,89	5,88

En cuanto a las puertas, en DesignBuilder no se puede especificar la materialidad de la puerta. La única configuración posible es porcentaje de apertura y tiempo en que permanece abierta, también en porcentaje. Ambos valores se utilizarán por defecto, lo cual corresponde a un 50% de apertura y a un 5% del tiempo permanece abierta.

Equipos instalados

La información de los equipos instalados en cada sistema y los patrones de ocupación de las oficinas en estudio fue entregada para la realización de esta investigación. La información no se encuentra lo suficientemente detallada y sólo permite realizar cálculo de potencia y ocupación por unidad de área de manera uniforme para todas las zonas. A continuación se muestran los resultados.

i. Iluminación

El sistema de iluminación corresponde a equipos de tubos fluorescentes estándar. El total de potencia por unidad de área se describe en la siguiente tabla,

Tabla I-5
Cargas de iluminación

Nombre	Potencia instalada [W/m²]
Zona 1	16,68
Zona 2	16,68
Zona 3	16,68
Zona 4	16,68
Zona 5	16,68

El horario de utilización también fue averiguado cuando se realizó el inventario, los resultados de ese horario se muestran en la siguiente figura

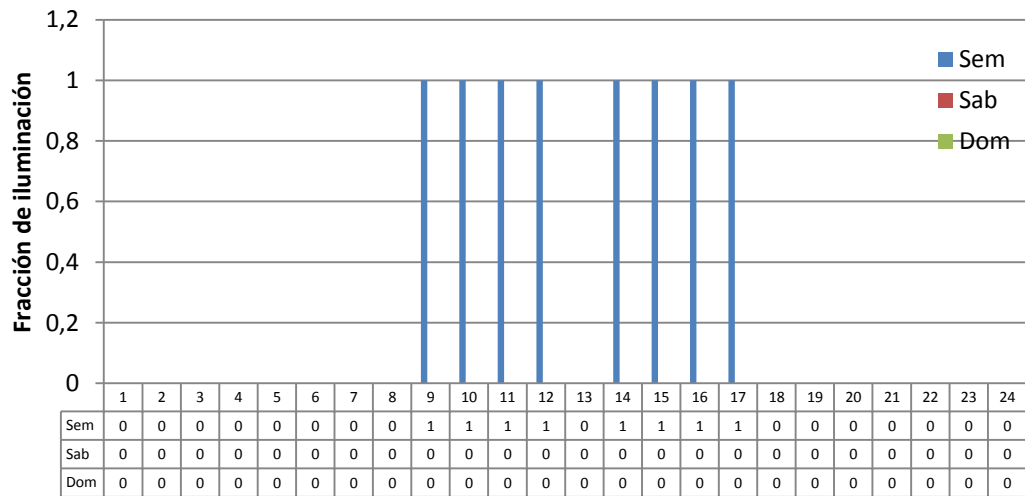


Figura I-5: Horarios de Iluminación según inventario

ii. Equipos de oficina

Las cargas internas serán separadas en dos categorías. Computadores y otros equipos. Esta separación es necesaria debido a que los computadores tienen un patrón de uso estable y que es fácil de identificar mientras que otros equipos, tales como impresoras, scanner, hervidores, entre otros, son muy irregulares en su uso. Los resultados se muestran a continuación

Tabla I-6
Cargas de computadores y equipos de oficina

Zonas	PC's [W/m ²]	Otros equipos [W/m ²]
1,2,3,4,5	31,69	19,10

El patrón de uso para computadores que fue establecido en el inventario es idéntico al de iluminación, (Figura I-5: Horarios de Iluminación según inventario). A su vez, en el inventario se establece que los otros equipos se utilizan durante una hora al día de lunes a viernes.

iii. Ocupación

En el inventario realizado no se consideró esta información, pero para esta etapa se asume que hay un trabajador por computador, por lo tanto usando la información acerca de los computadores se estima la ocupación, nuevamente expresado en un término uniforme para todas las zonas. Los resultados son mostrados a continuación

Tabla I-7
Ocupación sin calibrar

Nombre	Ocupación [W/m ²]
Zona 1	0,137
Zona 2	0,137
Zona 3	0,137
Zona 4	0,137
Zona 5	0,137

El horario de ocupación es idéntico al de iluminación (*Figura I-5: Horarios de Iluminación según inventario*).

iv. HVAC

En las zonas 1, 2, 3 y 4 se utiliza unidades de Fan Coil para el acondicionamiento de la temperatura. Los sistemas Fan Coil están constituidos por un ventilador, un elemento intercambiador de calor y un filtro. Cada unidad se conecta a tuberías por donde circula agua fría o caliente que pasa por el intercambiador de calor para acondicionar el aire. A continuación se presenta una ilustración de una unidad y el esquema de cómo es modelado este tipo de sistemas en DesignBuilder

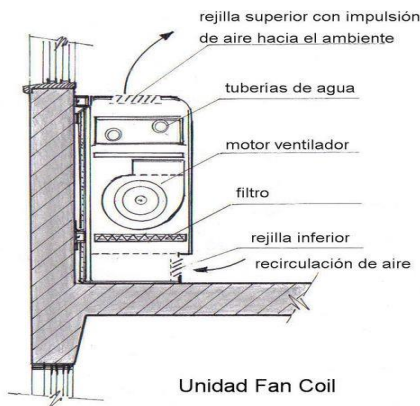


Figura I-6: Unidad FanCoil tipo (Obtenida de www.construmatica.com)

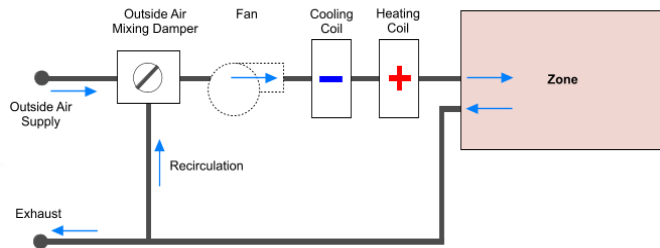


Figura I-7: Esquema FanCoil DesignBuilder (Obtenida www.designbuilder.co.uk)

A continuación, se detalla la cantidad de equipos Fan Coil y potencia instalada en cada zona

Tabla I-8
Potencia de HVAC en cada zona

Zona	Uso	Cantidad instalada	Potencia
Zona 1	Recepción	1	Potencia frigorífica: 3,4 kW Potencia térmica: 3,53 kW
Zona 2	Oficina	2	Potencia frigorífica: 6,8 kW Potencia térmica: 7,06 kW
Zona 3	Oficina	3	Potencia frigorífica: 10,2 kW Potencia térmica: 10,59 kW
Zona 4	Sala Reuniones	1	Potencia frigorífica: 3,4 kW Potencia térmica: 3,53 kW
Zona 5	Oficina	0	

Un esquema de ubicación de los equipos de HVAC instalados en las oficinas se presenta en la *Figura 4-6*.

Espacios adyacentes

Es muy importante en el modelo establecer qué tipo de adyacencia con las zonas aledañas se utilizará. Para esto es necesario conocer que espacios rodean a la oficina y su utilización.

- i. **Adyacencia con zona 6:** Corresponde a la otra mitad de la división Construcción, y posee las mismas características constructivas, similar equipamiento de oficina y también utiliza sistemas FanCoil para el acondicionamiento, además se tienen los mismos patrones de utilización. Es por esta razón que esta adyacencia se considera de tipo adiabática
- ii. **Adyacencia con zona 7:** Esta zona corresponde a un pasillo que conecta diferentes áreas dentro del edificio. Corresponde a una zona sin acondicionar y que posee una cara en contacto con el exterior. Se ha considerado una adyacencia normal para así considerar los flujos de calor entre ambas zonas
- iii. **Adyacencia nivel superior:** Corresponde al laboratorio de sólidos de la FCFM. Este espacio no está acondicionado por lo tanto se considerará una adyacencia normal
- iv. **Adyacencia nivel inferior:** Corresponde a un laboratorio de mezclas y espacios de oficina, no se tiene información acerca de si está acondicionada o no, por lo tanto se considerará una adyacencia adiabática en esta etapa.

Resultados de simulación no calibrada

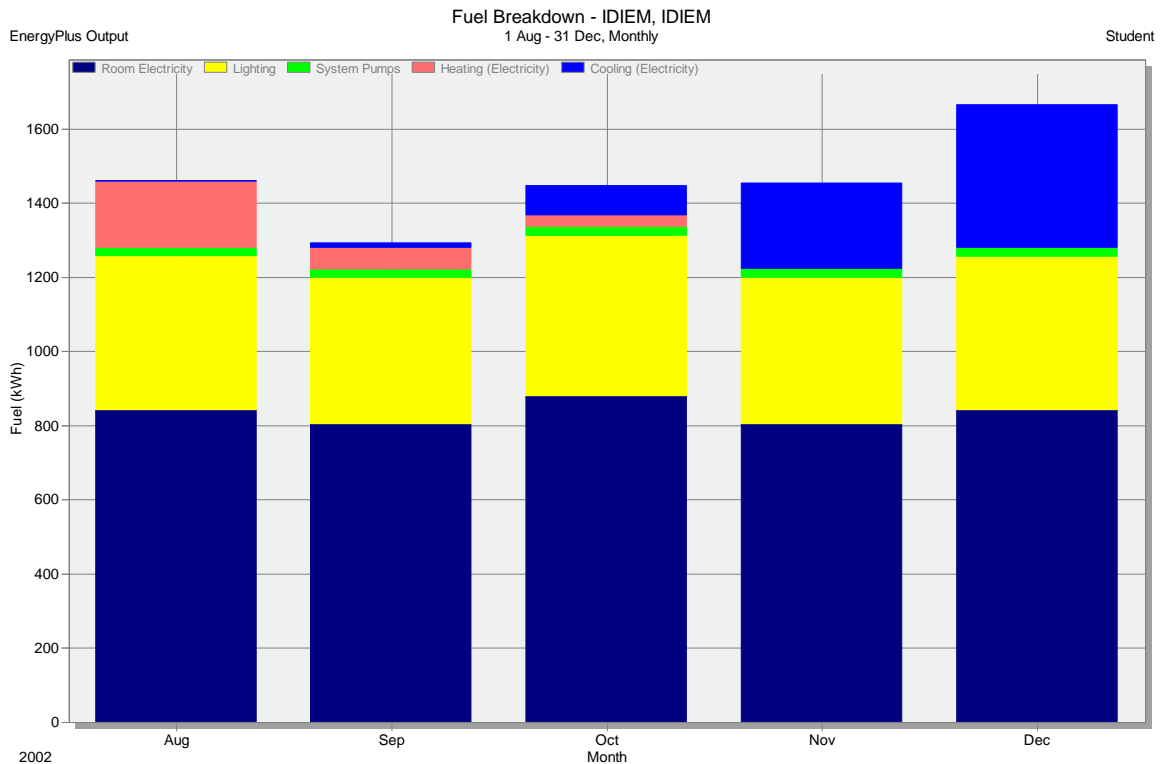


Figura I-8: Resultados simulación no calibrada

Una vez obtenidos los resultados, estos deben ser comparados con los datos registrados, los índices se muestran a continuación

Tabla I-9
Índices de calibración obtenidos en modelo inicial

NMBE	CV(RMSE)
86,37	78,17

Se observa que los índices están muy lejos de cumplir con los límites, por lo tanto se procede con la calibración del modelo.

I.4 Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se realiza una visita a la oficina con el objetivo de realizar un nuevo inventario, esta vez más detallado y preciso. En el cual se incluye toda la información acerca de los equipos de iluminación instalados, computadores, equipos de oficina y cualquier otro que resulte determinante, el detalle del inventario se encuentra en el Anexo III. Además se

realizan entrevistas a los trabajadores para conocer la cantidad de personas que trabajan en la oficina y conocer con detalle los patrones de utilización de cada sistema considerado.

Por otro lado, en la visita se tomó especial atención a características que no se pueden observar en ningún plano y que resultan muy determinantes. Entre ellas se destaca la utilización de elementos de sombreado interior en ventanas y la existencia de árboles en el exterior del edificio que modifican la radiación incidente. Por último se verifica que las oficinas aledañas se aproximen a la condición de adyacencia fijada en el paso anterior.

i. Ocupación.

La información obtenida a través de la entrevista a trabajadores se presenta en la siguiente tabla

Tabla I-10
Ocupación Calibrada

Nombre	Personas	Ocupación [personas/m2]
Zona 1	4	0,21
Zona 2	16	0,25
Zona 3	5	0,19
Zona 4	0	0,00
Zona 5	2	0,33

Los horarios de ocupación fueron definidos en base a la información que se pudo obtener de las conversaciones con los trabajadores. Se identifican 3 horarios distintos dependiendo si la utilización corresponde a plantas de oficina, oficina privada o recepción. Los horarios utilizados se presentan en los siguientes gráficos

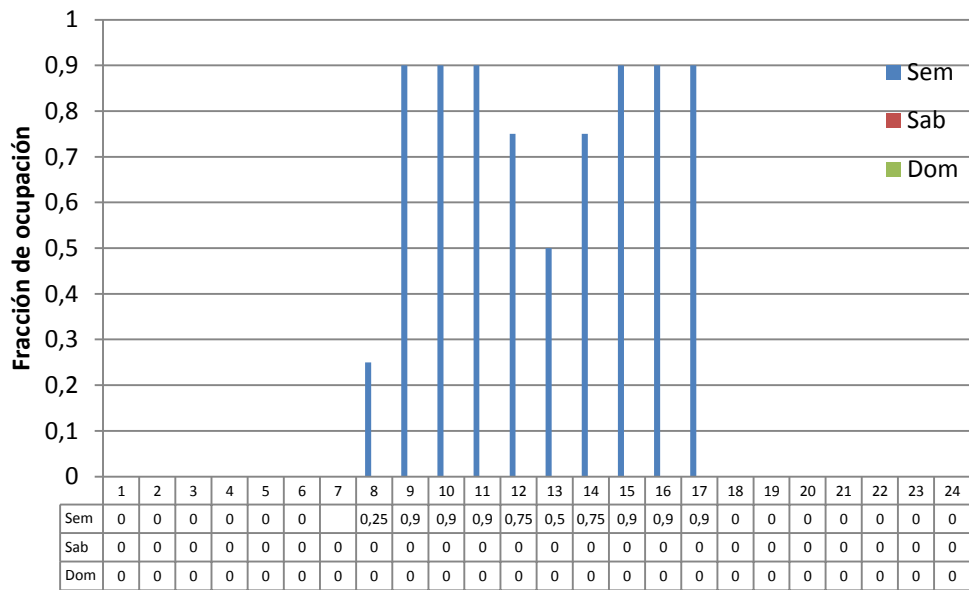


Figura I-9: Horario calibrado de ocupación zonas de recepción

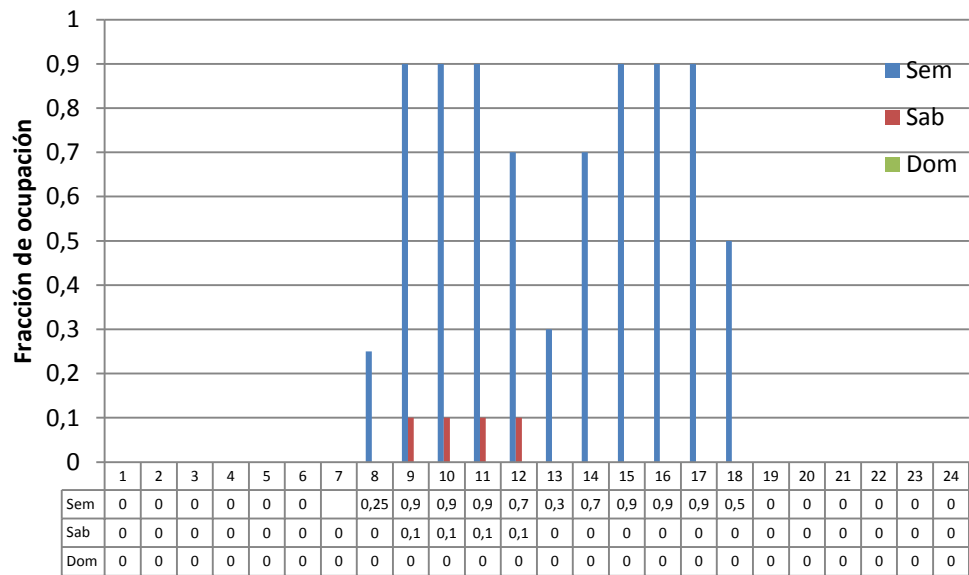


Figura I-10: Horario calibrado de ocupación zonas de plantas de oficina

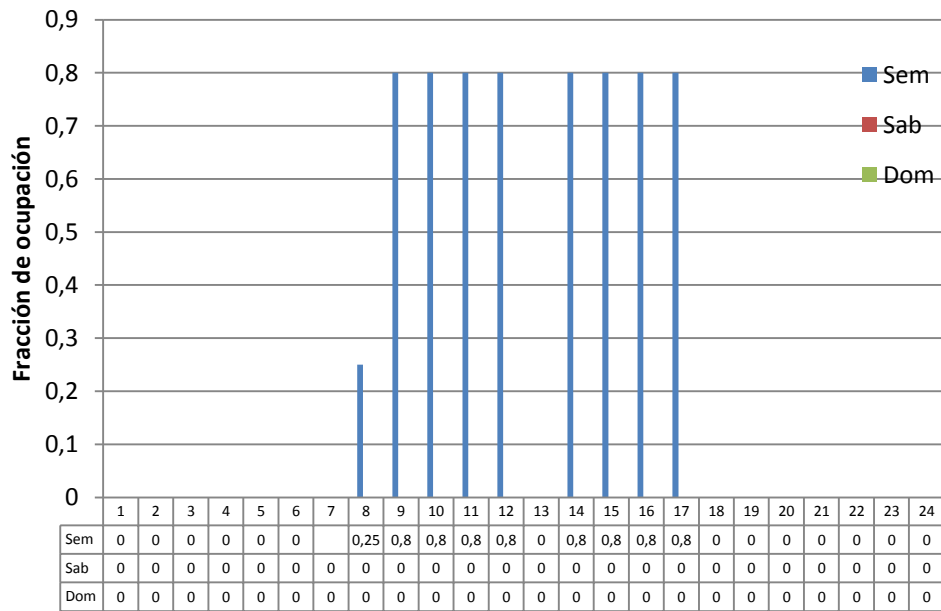


Figura I-11: Horario calibrado de ocupación oficinas privadas

ii. Equipos de oficina

A continuación, Tabla I-11, se muestra la potencia instalada por unidad de área correspondiente a cada zona. El detalle de equipos y potencias de cada uno se encuentra en el Anexo III.

Tabla I-11
Potencia calibrada equipos instalados

Nombre	Uso	Computadores [W/m ²]	Equipos de oficina [W/m ²]
Zona 1	Recepción	17,50	17,85
Zona 2	Oficina	13,63	48,38
Zona 3	Oficina	8,59	0
Zona 4	Sala		
	Reuniones	0,00	18,4
Zona 5	Oficina	9,17	0,00

Los horarios de utilización de los computadores corresponden a los horarios de ocupación de la oficina. Por otro lado se estima el uso diario de los equipos de oficina en 1 hora al día de lunes a viernes.

iii. Iluminación

La iluminación instalada en todas las zonas corresponde a Tubos Fluorescentes T5 de alta eficiencia de 28W cada uno. Además debe considerarse el consumo del ballast, el cual tiene una potencia de 32 W. Un esquema de ubicación de los equipos se presenta en la *Figura 4-6*. A continuación, *Tabla I-12*

Equipos de iluminación y potencia instalada en cada zona, se presentan los datos de potencia instalada por unidad de área.

Tabla I-12
Equipos de iluminación y potencia instalada en cada zona

Zona	Área	Tubos fluorescentes [uni]	Potencia [W]	Ballast [uni]	Potencia [W]	Potencia total [W]	W/m ²
1	22	8	28	4	32	352	16,00
2	56,5	20	28	10	32	880	15,58
3	32	12	28	6	32	528	16,50
4	12	6	28	3	32	264	22,18
5	6	2	28	1	32	88	14,67

En base a entrevistas con los trabajadores del edificio, se obtienen los siguientes horarios de utilización de iluminación para las zonas de recepción, planta de oficina y oficinas privadas.

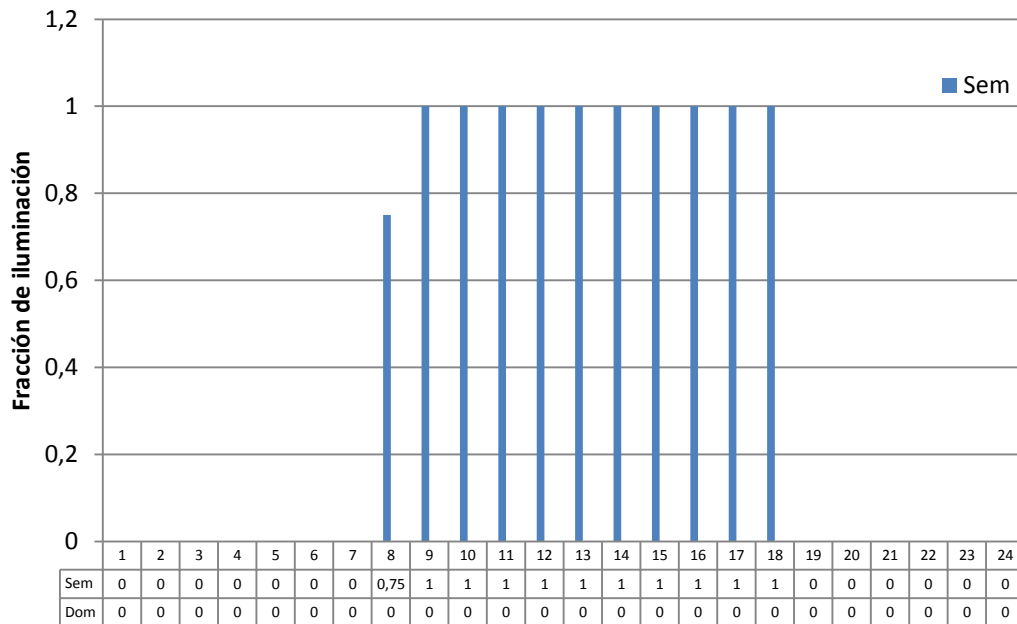


Figura I-12: Horario calibrado utilización iluminación recepción

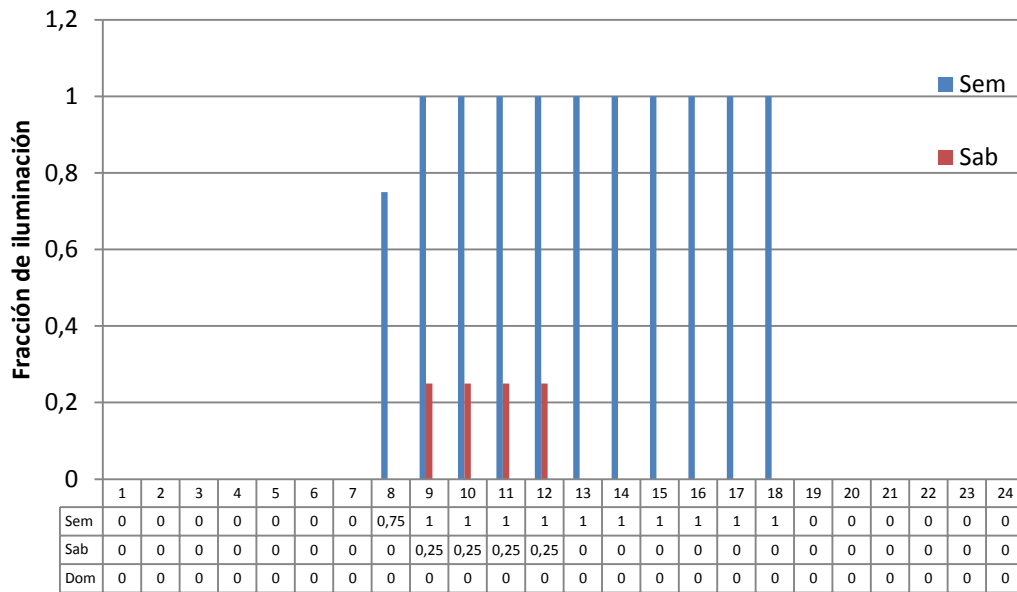


Figura I-13: Horario calibrado utilización iluminación para plantas de oficinas

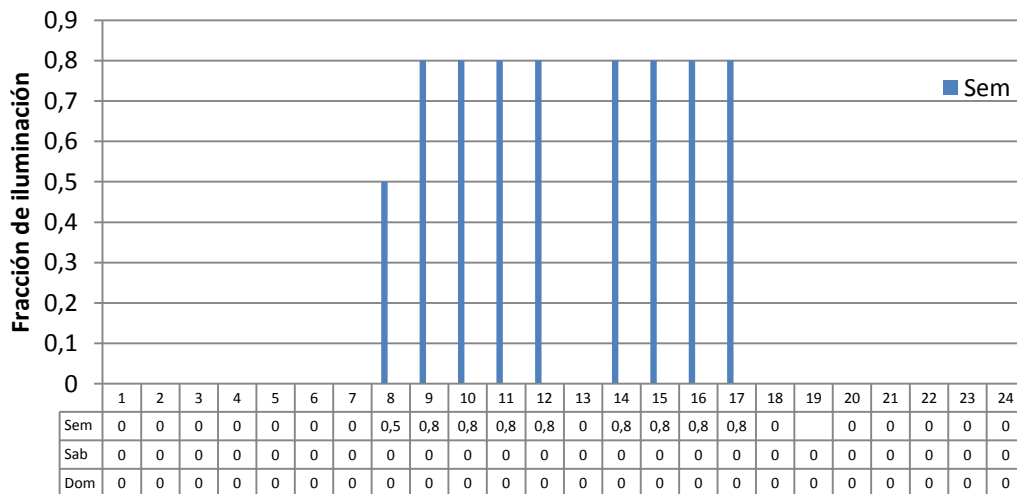


Figura I-14: Horario calibrado utilización iluminación para oficinas privadas

iv. Sombreamiento externo

En las afuera del edificio se encuentra la plaza Ercilla, en dónde existen árboles que interfieren en la radiación solar incidente sobre el edificio. Además de los árboles en la plaza, contiguo a la oficina en estudio existe un jardín interior que también posee árboles que entregan sombra de forma permanente al edificio.

DesignBuilder no tiene la capacidad de modelar directamente los árboles pero se puede emular su comportamiento agregando bloques de componente, los cuales modifican la radiación solar incidente en el modelo.

En la visita a terreno se registró, de manera estimada, el tamaño y ubicación de los árboles (ver *Figura 4-8*). Además, es necesario averiguar si son perennes o caducifolios, es decir, de hoja permanente o estacional. Los árboles con comportamiento estacional se modelan mediante uso de bloques de componente con reflectancia variable dependiendo de la estación, lo cual se logra incorporando un calendario de reflectancia en el modelo. En este caso los árboles son perennes.

v. **Sombreamiento ventanas**

En la visita a la oficina se observó la utilización de cortinas interiores tipo roller en todas las ventanas. En el modelo las cortinas fueron incluidas directamente utilizando la opción para sombreado local que posee DesignBuilder.

vi. **Días festivos**

DesignBuilder no considera los días festivos de manera predeterminada, por lo tanto hay que agregar la información de días festivos en los horarios de utilización de los sistemas eléctricos y de ocupación.

Ajuste del modelo

El modelo fue simulado 9 veces, cada una de ellas con una variación de un parámetro en específico. En la *Figura I-15*: Resultados de cada etapa de calibración para consumo total se muestra los resultados después de cada análisis. Las variaciones realizadas en las nueve simulaciones se describen a continuación

- Simulación 1: Resultados de la simulación anterior
- Simulación 2: Ajuste de los horarios de ocupación
- Simulación 3: Ajuste de la densidad de ocupación
- Simulación 4: Ajuste de las cargas internas
- Simulación 5: Ajuste de los horarios de iluminación
- Simulación 6: Ajuste de la potencia de iluminación
- Simulación 7: Se modela sombreado externo (árboles)
- Simulación 8: Se modela el sombreado de las ventanas
- Simulación 9: Se integran los días festivos al calendario.

A continuación se muestra la variación de los resultados y tolerancias de calibración con cada simulación

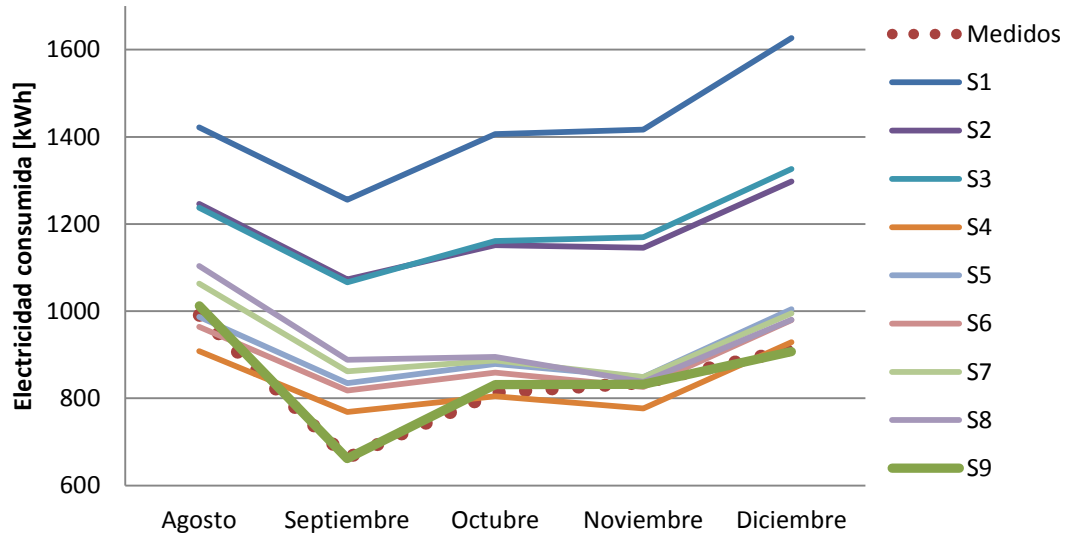


Figura I-15: Resultados de cada etapa de calibración para consumo total de electricidad

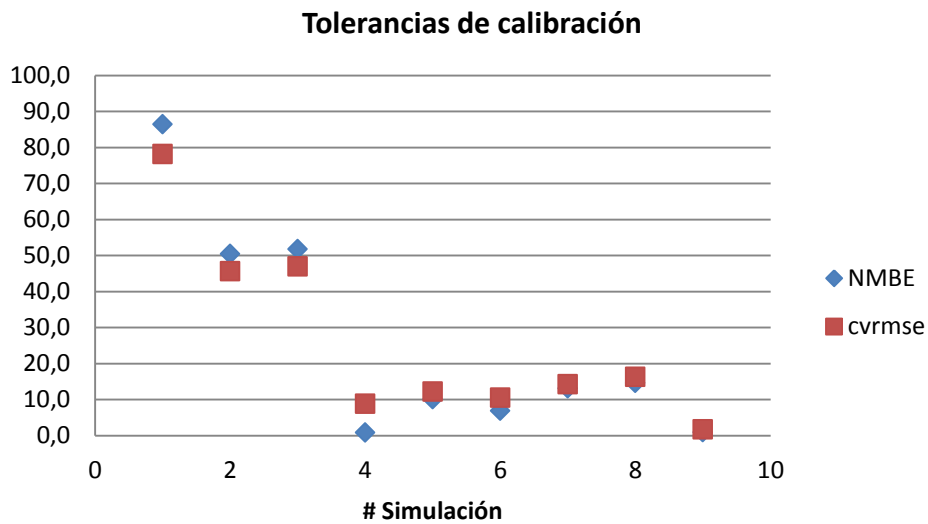


Figura I-16: Tolerancias de calibración obtenidas en cada etapa de calibración

Al cabo de las 9 simulaciones realizadas, se obtienen los siguientes índices de tolerancias de calibración

Tabla I-13: Tolerancias de calibración

	Total
CV(RMSE)	1,7
NMBE	0,9

Se observa que ambos cumplen holgadamente con los límites expuestos en la Tabla 3-1. Se puede afirmar entonces que la calibración ha sido realizada de manera apropiada y los resultados son confiables.

Anexo II. Calibración desagregada de cada sistema instalado

A continuación se presenta los gráficos de calibración para cada sistema instalado en las oficinas evaluadas, además se presente la variación del error con cada ajuste.

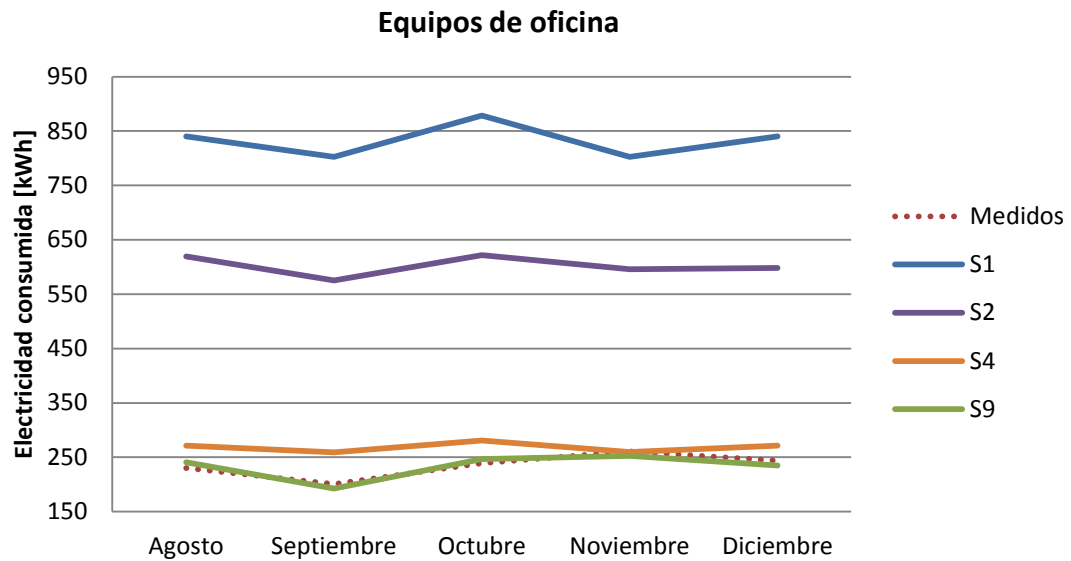


Figura II-1: Resultados de calibración para los equipos de oficina

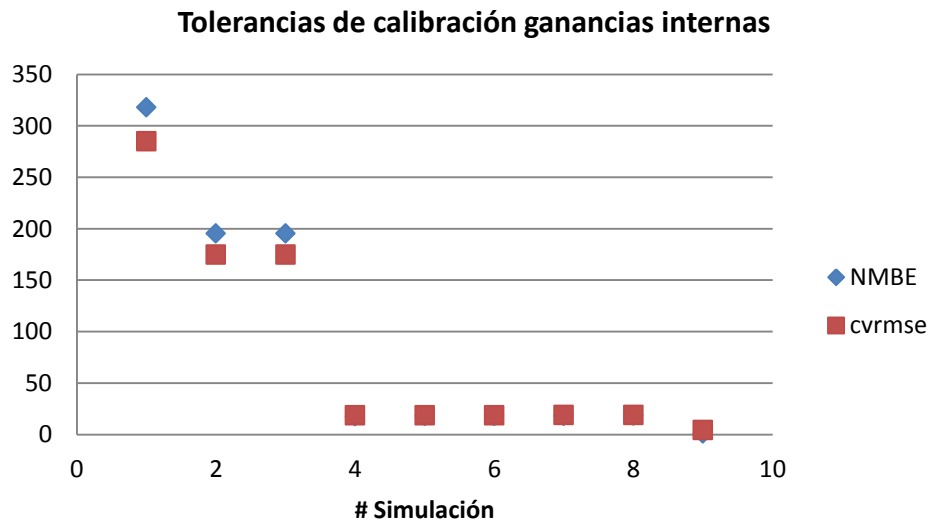


Figura II-2: Variación tolerancias calibración en cada simulación para los equipos de oficina

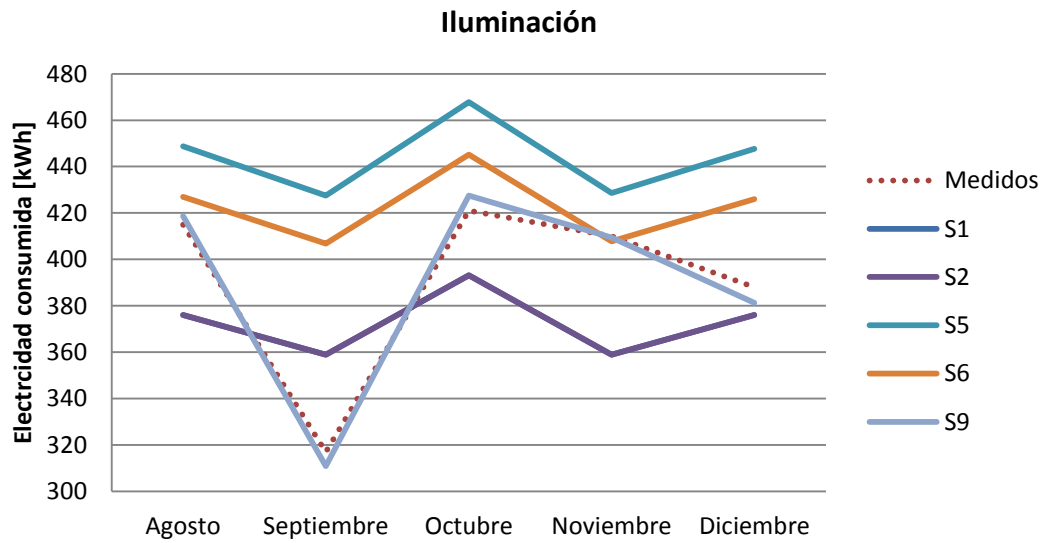


Figura II-3: Resultados de calibración para sistema de iluminación

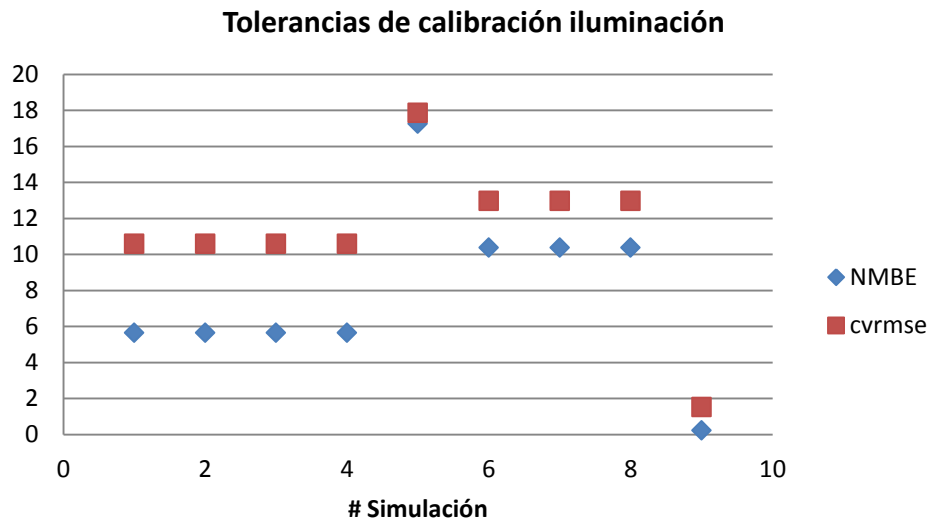


Figura II-4: Variación tolerancias calibración en cada simulación para sistema de iluminación

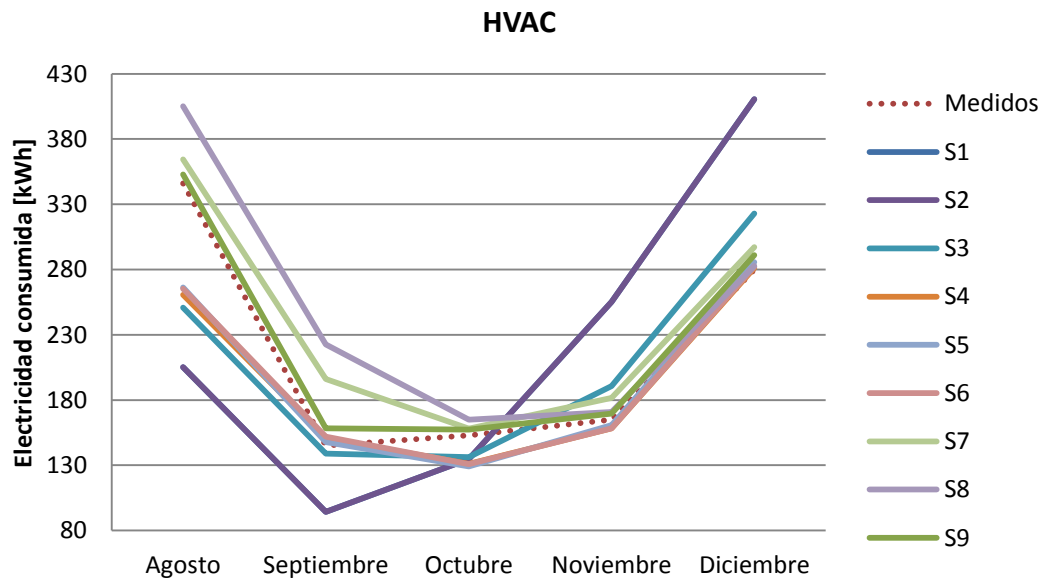


Figura II-5: Resultados de calibración para sistema de HVAC

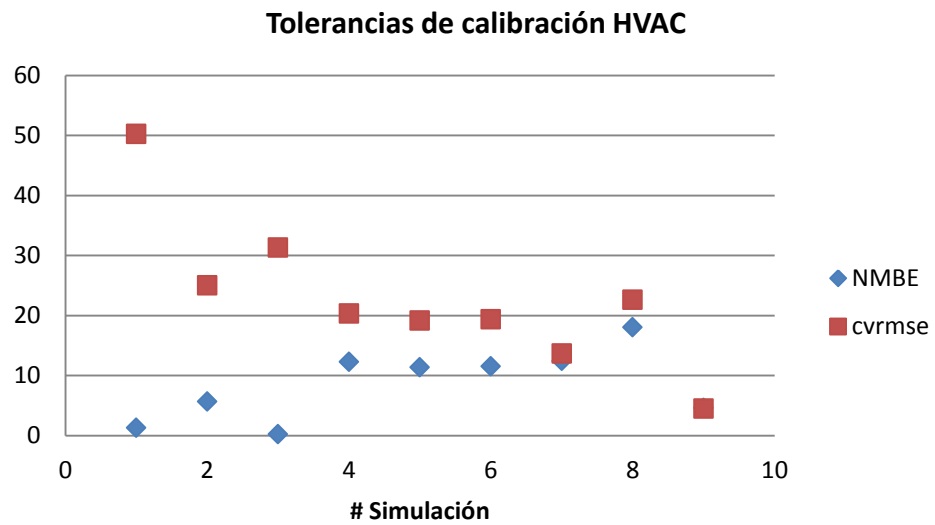


Figura II-6: Variación tolerancias calibración en cada simulación para sistema de HVAC

Por último, se muestran los índices de calibración obtenidos al final de todos los ajustes:

Tabla II-1*Tolerancias de calibración finales para cada sistema*

Ganancias internas		Iluminación		HVAC	
NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)	NMBE	CV(RMSE)
0,8	4,3	0,2	1,5	4,6	4,5

Se observa que cada sistema cumple con los límites de tolerancia permitidos en la metodología.

Anexo III. Inventario detallado de equipos instalados

Tabla III-1

Inventario de equipos registrados en visita a terreno

Zonas	Utilización	Personas	Computadores			Luminaria			HVAC				Otros equipos			
		Cantidad	Tipo	Canti.	Pot. [W]	Tipo	Canti.	Pot. [W]	Tipo	Canti.	Pot. Calorif. [W]	Pot. Refriger. [W]	Tipo	Canti.	Pot. [W]	
Zona 1	Recepción	4	Notebook	1	60	Doble	4	56	Fan coil	1	3530	3400	Impres. Chica	1	375	
			CPU	3	55	Ballast	4	22								
			Pantalla	3	70											
Zona 2	Planta de oficinas	16	Notebook	14	60	Doble	10	56	Fan coil	2	3530	3400	Hervidor	1	2000	
			pantalla	3	70	Ballast	10	22					Impres. Chica	1	375	
														Impres. Grande	1	700
														Dispensador agua	1	70
Zona 3	Oficina individual	5	Notebook	4	60	Doble	6	56	Fan coil	3	3530	3400				
			pantalla	1	70	Ballast	3	22								
Zona 4	Sala de reuniones	0				Doble	3	56	Fan coil	1	3530	3400	Proyector	1	240	
						Ballast	3	22								
Zona 5	Oficina individual	2	Notebook	2	60	Doble	1	56								
						Ballast	1	22								