



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Diagnóstico de sustentabilidad
energética de la Sede de la
UNAM en Canadá**

T E S I N A

Que para obtener el título de

Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Carlos Leonardo Velázquez Zúñiga

TUTOR DE TESINA

Dr. Jesús Antonio del Río Portilla

Temixco, Mor., a 18 de agosto de 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



OF/IER/LIER/074/2023
ASUNTO: Notificación de jurado y
fecha para examen profesional.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente

Por medio de la presente le informo que el día viernes 18 de agosto de 2023, a las 13:30 h, en el Instituto de Energías Renovables, el **C. CARLOS LEONARDO VELÁZQUEZ ZÚÑIGA**, con número de cuenta 418128480 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación de su trabajo de titulación y examen profesional titulado:

***“Diagnóstico de sustentabilidad energética
de la Sede de la UNAM en Canadá”***

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE: DR. JORGE ANTONIO ROJAS MENÉNDEZ
VOCAL: MTRA. VERUSHKA GÓMEZ DICKINSON
SECRETARIO: DR. JESÚS ANTONIO DEL RÍO PORTILLA
SUPLENTE: DR. MIGUEL ROBLES PÉREZ
SUPLENTE: DR. CONSTANTINO DE JESÚS MACÍAS GARCÍA

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 26 de julio de 2023

Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp.



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

Índice general

Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Notación	XI
Planteamiento del problema	XIII
Objetivo General	XIII
Objetivos Específicos	XIII
Justificación	XIII
Alcance	XIV
1 Modernización Energética de Edificaciones	1
§1.1 Datos Meteorológicos de Gatineau	2
§1.1.1 Temperatura	2
§1.1.2 Precipitación	5
§1.1.3 Lluvia	5
§1.1.4 Nieve	6
§1.1.5 Duración de día	7
§1.1.6 Recurso Solar	9
§1.2 Certificación LEED	10
§1.2.1 Prerrequisitos de evaluación	10
§1.2.2 Categorías de evaluación	11
§1.3 Sustentabilidad en edificios, Canadá	12
§1.3.1 ¿Qué es el DER?	12
2 Auditoría del edificio	15
§2.1 El edificio UNAM-Canadá	15
§2.1.1 Materiales de la envolvente	16
§2.1.2 Equipos de calefacción, ventilación o aire acondicionado (HVAC)	20
§2.1.3 Historial de Consumo Energético: Eléctrico y Térmico	23
§2.1.4 Horarios y Ocupación	24

§2.2 Monitores de <i>CO₂</i> , <i>Temperatura</i> y <i>Humedad relativa</i>	25
§2.2.1 Ubicación y Distribución	28
3 Resultados	30
§3.1 Calidad del aire al interior	30
§3.1.1 Concentración de <i>CO₂</i>	31
§3.1.2 Humedad Relativa	34
§3.2 Energía	35
§3.2.1 Consumo Térmico	35
§3.2.2 Consumo Eléctrico	36
§3.3 Salida Emergencia Norte	38
4 Discusión	42
5 Conclusiones	45
6 Trabajos Futuros	46
7 Anexos	47
§7.1 Gráficas Concentraciones <i>CO₂</i> en ocupación máxima	47
§7.2 Planos del Edificio	49
§7.3 <i>Constructions</i> de muros del edificio para simulaciones energéticas	50
Bibliografía	51

Índice de figuras

1.1	<i>Sensación térmica por hora en Gatineau</i>	3
1.2	<i>Temperatura año típico en Gatineau</i>	4
1.3	<i>Milímetros acumulados de lluvia promedio mensual en Gatineau</i>	6
1.4	<i>Milímetros acumulados de nieve en promedio por mes en Gatineau</i>	7
1.5	<i>Número de horas de luz solar en Gatineau</i>	7
1.6	<i>Salida y puesta del sol a lo largo del año en Gatineau</i>	8
1.7	<i>Promedio diario de energía solar incidente en Gatineau</i>	9
2.1	<i>Nomenclatura del número de modelo de acuerdo a la guía técnica [23]</i>	22
3.1	<i>Ejemplo de ajuste donde se observa una buena concordancia, dentro del intervalo de confianza, entre la ecuación empírica y los datos. Aula 215 19/01/23</i>	33
3.2	<i>Caso hipotético de energía generada vs consumida diariamente</i>	38
3.3	<i>Salida Emergencia Norte Planta Baja</i>	39
3.4	<i>Comportamiento térmico de la envolvente con el exterior en invierno</i>	40
3.5	<i>Concentración de CO₂ en Salida Emergencia Norte</i>	41
7.1	<i>a) Aula 015 19/01/23, b) Aula 208 19/01/23</i>	47
7.2	<i>a) Aula 215 19/01/23, b) Aula 015 27/01/23</i>	47
7.3	<i>a) Aula 015 20/01/23, b) Aula 215 20/01/23</i>	48
7.4	<i>a) Aula 015 23/01/23, b) Aula 215 23/01/23</i>	48
7.5	<i>a) Aula 215 24/01/23, b) Aula 015 25/01/23</i>	48
7.6	<i>a) Aula 215 25/01/23, b) Aula 015 26/01/23</i>	48
7.7	<i>Plano cenital del edificio</i>	49
7.8	<i>Capas de los diferentes muros presentes en el edificio</i>	50

Índice de tablas

1.1	Temperatura superior, promedio e inferior por mes	4
1.2	Días con registro de precipitación al mes en Gatineau	5
1.3	Milímetros acumulados de lluvia media mensual en Gatineau	6
1.4	Milímetros acumulados de nieve en promedio por mes en Gatineau	7
1.5	Número de horas de luz solar en Gatineau	8
1.6	Promedio diario de energía solar irradiante en Gatineau	9
1.7	Conjunto de tecnologías básicas para DER. Traducción libre de [24]	14
2.1	Distribución de los espacios en la sede UNAM-Canadá	16
2.2	Propiedades termofísicas de los materiales de los muros de la Sede. Obtenido de I	19
2.3	Consumo eléctrico del edificio	23
2.4	Consumo de gas del edificio	23
3.1	Concentración de CO_2 registrada en temporada de invierno	31
3.2	Coefficientes de ajustes exponenciales a datos de concentración de CO_2	32
3.3	Humedad Relativa registrada en temporada de invierno	34
3.4	Temperatura registrada en temporada de invierno	36
3.5	Posible porcentaje de consumo eléctrico cubierto por la instalación fotovoltaica estimada	38
3.6	Resultados de monitoreo Salida Emergencia Norte	39

«Mira el mundo, ..., mira el mundo antes de haber engullido demasiada física y química. En este momento, grandes manadas de renos salvajes corren por la asolada planicie de Hardanger. En la isla de la Camargue, entre dos brazos de la desembocadura del río Ródano están incubando miles de flamíngos rosados. Cautivadores rebaños de esbeltas gacelas saltan como por arte de magia por la sabana africana. Miles y miles de pingüinos reales charlan en una playa helada de la Antártica, y no sufren -ya que nada esperan-, están a gusto. Pero no solo cuenta la cantidad. Un alce solitario y meditabundo asoma la cabeza en un bosque de abetos al este de Noruega. Una foca rellenita se lanza al agua desde un islote cerca de Tönsberg.

No me digas que la naturaleza no es un milagro. No me digas que el mundo no es un maravilloso cuento. Quien no lo haya entendido, tal vez no lo haga hasta el momento en que el cuento esté a punto de acabar. Pues es cuando se te da la última oportunidad de quitarte las anteojeras, una última ocasión de frotarte los ojos de asombro, una última ocasión de entregarte a este milagro del que ahora te despides y al que vas a abandonar. Me pregunto si entiendes lo que estoy intentando expresar. Nadie se ha despedido llorando de la geometría de Euclides o del sistema periódico de los átomos. Nadie se echa a llorar porque va a ser desconectado de internet o de la tabla de multiplicar. Es del mundo de lo que uno se despide, de la vida, del cuento.

[...]

¿Que habrías elegido tú?»

La joven de las mandarinas, Jostein Gaarden

A mi Padre y a Eva

*A quienes ha vencido a sus demonios. Tras identificarlos,
aceptarse y alejando el origen de su actuar de estos.
Hallando así paz, o cuanto menos, entendimiento.*

Agradecimientos

Ha transcurrido el tiempo desde que inicié mi ingeniería, con ello se acumularon cosas que, hoy que culmina este proceso, agradezco. Segmentado en lo académico, lo familiar y lo personal:

Respecto al primer campo agradezco a muchos de las profesoras y profesores con los que tuve la fortuna de aprender en sus cursos. A lo que me remonto hasta las primeras etapas de mi vida. En el instituto; a la Dra. Hailin por explicar las veces que fueron necesarias para que *Calitos* entendiese. Al Dr. Mariano y Dr. Robles por empapar cada clase de física y matemática con ese característico enfoque. Lo que motivó mi movilidad para experimentarlo en primera persona en la Facultad de Ciencias. Al Dr. Edgar Santoyo por aceptar ser mi asesor de carrera y serlo realmente. Escuchado mis crisis los primeros semestres y orientarme de la forma que lo caracteriza; muy estadísticamente, pero siempre amable y humano. Al Dr. Del Río de quien valoro con demasía haber trabajado bajo su cargo. Por la cercanía, paciencia, guía, confianza y amistad así como los logros compartidos como el que hoy presento. A Maribel, Carlos y Claudia que siempre estuvieron al filo del cañón, cargando la LIER, gracias verdaderamente. Al Mtro. Jose Eduardo Romo su gran amabilidad, comentarios y disposición durante mi proceso de titulación. Al Dr. Constantino Macías por su honorable trato e impecable actuar, así como su vasto conocimiento notable hasta en un viaje por autopista. Siempre habrá una Guinness a medio día que querré compartir con usted. A toda la comunidad de la UNAM-Canadá, mi estimada Laurence, mis estimados Leobardo, Andrés, Alex y Gerardo. Todas y todos de la Sede por la calidez y apoyo brindados todos los días. To Barry Nolin for being a *people of goodness* keeping in mind the wonder of life, a quality for which we are friends.

A mi familia, de forma cronológica: agradezco a mi madre por mi madre mi abuela Zoia. A mi amada Madre por brindarme la Vida más por mostrarme el significado de Amor. A Carito por toda la cultura y "súperbombas de nutrición" que procuro desde mi temprana edad. A mis queridos tíos Mario y Neto. A mi hermana Ana, por toda su valentía y fortaleza, así como ser la más grande lección en mi Vida. A mi tía Bertha por su hermoso amor y ser

hombro al confiar en mí en momentos clave. A mi Betha Elisa (pez Jo) por ser compañera de Vida hacerla alegre. Isaías regalo de la vida. A mi Enkki por la más leal compañía, por todas las veces que me salva estando.

Finalmente, bajo el grado más alto de libertad, que es la elección agradezco a las personas que considero amigas y amigos, aquellas personas que estuvieron cerca, de las que he aprendido y disfrutado compartir vidas. Ernesto hoy convergemos la serie, hermano, acercándonos a ser SH. Ana Campirana por ser *buscadora* conmigo. EDO por ser espejo. Karlita mi áter ego desde el primer día. Taku a quien admiro y aprecio. Momo por el significado de ese nombre y *aquello que escogimos compartir*. July, Pau y Or siempre es bueno volver a San Juan por ustedes.

Gracias a la mi casa de estudios la UNAM, a DGECEI la apertura del programa PITAAE cuestión fundamental durante mi formación académica.

Resumen

La sustentabilidad es un tema de gran relevancia para el futuro de nuestra especie en el planeta, pues este concepto condensa la importancia de los aspectos Sociales, Ambientales y Económicos aplicados de tal forma que pueden mantenerse en el tiempo. En particular es esencial en la conceptualización de las edificaciones futuras y adecuación de las actuales, ya que es donde pasamos la mayor parte de nuestro tiempo; desarrollando actividades dentro de un recinto. La búsqueda de edificaciones más eficientes y amigables con el medio ambiente es cada vez más importante. En este sentido, la certificación LEED (por sus siglas en inglés Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) se ha consolidado como un referente en la evaluación de edificios sostenibles a nivel mundial. En Canadá, uno de los países líderes en el desarrollo de construcciones sustentables, la certificación LEED ha sido ampliamente adoptada como una herramienta para la mejora continua de los edificios acercándolos a la sustentabilidad. En este contexto, se llevó a cabo una auditoría de sustentabilidad a la sede UNAM-Canadá, con el objetivo de analizar su consumo térmico y eléctrico, así como la calidad del aire en su interior. La auditoría se realizó siguiendo algunas de las pautas establecidas por la certificación LEED O+M; Operación y Mantenimiento para edificios existentes, con el fin de determinar el nivel de cumplimiento del edificio en relación con los estándares de sustentabilidad canadienses e internacionales de construcción, energía, sistemas de climatización, etc.

La auditoría de sustentabilidad a la Sede permitió identificar una serie de áreas de mejora en el edificio. En primer lugar, se evaluó el consumo térmico del edificio, analizando la eficiencia energética de los sistemas de climatización. En este sentido, se detectaron algunos problemas en el control de la temperatura en zonas del edificio, lo que causa un consumo energético elevado. Por otro lado, se evaluó también el consumo eléctrico del edificio, para lo que se estimó, *grosso modo*, la cobertura del consumo con energías renovables. Finalmente, se realizó la evaluación la calidad del aire en el interior del edificio, analizando la ventilación y la calidad del aire en las diferentes áreas del edificio. Se identificó, a partir del monitoreo de la humedad relativa y la concentración de CO_2 durante los meses de enero a abril, una

falta de ventilación adecuada en algunas zonas del edificio, lo que llevó a una acumulación de dióxido de carbono en el aire. Se propuso la instalación de sistemas de ventilación más eficientes y modernos, así como el uso de técnicas pasivas de ventilación, para mejorar la calidad del aire en el interior del edificio y reducir el impacto en la salud de los ocupantes.

Las recomendaciones propuestas pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética y la calidad ambiental del edificio, este tipo de proyectos juega un papel fundamental para avanzar, como consecuencia, a un futuro sustentable.

Notación

QC: Provincia de Quebec

°C: grados Celcius

°F: grados Fahrenheit

K: grados Kelvin

DST: Horario de verano

kWh: kilo-Watts-hora

m: metros

*m*²: metros cuadrados

*m*³: metros cúbicos

GJ: GigaJoules

*CO*₂: Concentración de Dióxido de Carbono
[*ppm*]

*CO*_{2eq}: Emisiones de Dióxido de Carbono
Equivalente [*ppm*]

λ : Conductividad térmica [$\frac{W}{m \cdot K}$]

ρ : Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]

c: Calor específico [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

TAC: Coeficiente de Absorción Térmica

SAC: Coeficiente de Absorción solar

HVAC: Sistemas de calentamiento, ventilación y aire acondicionado

*T*_{des,cal}: Temperatura de diseño para calentamiento [°C]

*T*_{des,enf,dry}: Temperatura de diseño para enfriamiento bulbo seco [°C]

*T*_{des,enf,wet}: Temperatura de diseño para enfriamiento bulbo húmedo [°C]

V: Volts

Hz: Hertz

A: Amperes

” o in: pulgadas

BTU: Unidades Térmicas Británicas

*E*_c: Eficiencia Térmica

SEER: Factor de Eficiencia Energética Estacional

hfs: horas de funcionamiento semanales [*h*]

ppm: Partes por millón

β : Coeficiente de amplitud

α : Tasa de cambio

R^2 : Coeficiente de Determinación

σ : Desviación estandar

E_T : Energía Total $[MJ]$

$\eta_{caldera}$: Eficiencia térmica de caldera

GEI : Emisiones de gases de efecto invernadero

Ton : Toneladas

Eg : consumo de energía eléctrica promedio diario $[kJ]$

P_P : Potencia Pico $[kW]$

HSP : Horas Solares Pico $[1 kW/m^2]$

RH : Humedad Relativa $[\%]$

t : tiempo $[min]$

Planteamiento del problema

El edificio de la UNAM-Canadá es un recinto de al menos 40 años de antigüedad. Ubicado en Gatineau (QC, Canadá) donde la temperatura exterior varía entre $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. El confort térmico y la calidad del aire al interior de la edificación y el uso eficiente de la energía son los principales retos a solucionar tomando como guía las normativas de construcción canadiense así como los créditos de certificaciones de edificaciones sustentables activas en el país. Este trabajo pretende generar propuestas en esa dirección tras evaluar el estado actual de la Sede.

Objetivo General

Establecer las condiciones actuales del edificio a fin de identificar las principales áreas a mejorar mediante la implementación de estrategias que incrementen la sustentabilidad del edificio.

Objetivos específicos

- Armar, programar e instalar 10 sensores para monitorear el edificio
- Determinar el año típico meteorológico conforme a la ubicación del edificio a fin comparar con las mediciones al interior.
- Realizar un diagrama simplificado del recinto considerando a las modificaciones más recientes
- Determinar estrategias preliminares acorde a la auditoría energética y de calidad de aire realizada para hacer de la sede una edificación más sustentable

Justificación

En 1995 la Universidad Nacional Autónoma de México funda, en la provincia de Quebec (QC) en la ciudad de Gatineau, la segunda escuela internacional. Asentándose en una edificación antigua en el barrio de Hull. Durante los 28 años posteriores a la fundación de esta sede, se han realizado modificaciones al interior del edificio, pero hasta el momento no se había llevado a cabo un estudio que buscara identificar las condiciones del edificio en términos de sustentabilidad, eficiencia energética y calidad de aire, modernizar o innovar el edificio acorde a las condiciones climáticas en el que se localiza esta extensión de la máxima casa de estudios de México.

Alcance

Descripción detallada de las condiciones actuales del edificio de la sede en términos del uso de energía eléctrica y térmica, así como la calidad del aire al interior en la temporada de invierno. Identificar las áreas de oportunidad de mejora en el edificio, por medio de estrategias preliminares con la visión de incrementar la sustentabilidad de la escuela.

Capítulo 1

Modernización Energética de Edificaciones

Llevar a cabo un proyecto profundo de modernización energética o *deep energy retrofit (DER)* a edificios de 20 o más años de antigüedad es importante por varias razones. En climas extremos, como los que caracterizan a Canadá, los edificios antiguos pueden tener sistemas ineficientes de calefacción, ventilación y aire acondicionado que consumen grandes cantidades de energía y aumentan los costos de operación y mantenimiento. En algunos casos la envolvente del edificio presenta deficiencias por el desgaste de los materiales lo que permite filtraciones de aire frío (en invierno) o caliente (en verano), lo que aumenta la carga de calefacción y refrigeración. Realizar un *deep energy retrofit* puede solucionar estos problemas al mejorar la eficiencia energética del edificio mediante la actualización de los sistemas mecánicos, la envolvente del edificio o las necesidades que se determinen en su auditoría. Esto puede reducir significativamente el consumo de energía, por lo tanto, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las normativas, estándares y guías de certificación de edificios verdes, son útiles para tomar decisiones informadas en este tipo de proyectos *retrofit*. Éstas proporcionan pautas, para los niveles a cubrir, de eficiencia energética y la calidad del aire interior, garantiza que los edificios sean seguros, saludables y confortables para quienes hacen uso de las instalaciones.

Realizar una auditoría energética a un edificio en Gatineau, Canadá, requiere un enfoque sistemático y un conjunto de herramientas y técnicas adecuadas. Una de las primeras actividades a realizar es la caracterización meteorológica del sitio de interés donde se realiza el proyecto. Como primera labor se presenta la información de un año típico meteorológico de la ciudad de Gatineau, gran parte de esta información y gráficos se obtuvo del sitio de datos

abiertos [8] que presenta un reporte basado en un análisis estadístico de datos climatológicos históricos por hora y reconstrucciones con el modelo MERRA-2 para una serie. Los datos considerados van del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2016 proporcionados por la estación del Aeropuerto de Gatineau (YND) y el Aeropuerto Internacional McDonald-Cartier de Ottawa (YOW).

En este capítulo también se describen brevemente las principales características de la certificación LEED, posteriormente se presentan datos acerca de edificaciones en un contexto de Canadá, finalizando con la definición de *DER*, así como renovaciones comunes en la búsqueda de la eficiencia energética.

1.1. Datos Meteorológicos de Gatineau

Empecemos con los datos meteorológicos del sitio de interés; la ciudad de Gatineau pertenece a la provincia de Quebec al este de Canadá. Una de las principales características del clima en esta ciudad son las estaciones de verano e invierno por sus condiciones radicales, en torno a las precipitaciones -tanto lluvias como nevadas-, temperatura y humedad. El verano es una estación que se caracteriza por sus temperaturas elevadas tanto como por los días de lluvia que se presenta en promedio 10 veces por mes. Por otro lado, durante el invierno, la temperatura es fría con grandes significativas de nieve, el cielo nublado la mayor parte de los días y porcentajes de humedad que caracterizan la temporada como seca.

1.1.1. Temperatura

La temporada de calor abarca aproximadamente 4 meses, entre mediados de mayo a finales de septiembre. En ésta, la temperatura máxima promedio diariamente se registra por encima de 20 °C. El mes más caluroso del año, en esta región, es julio donde la temperatura promedio exterior va entre 15 y 26 °C. Por otra parte, la temporada de frío tiene una duración aproximada de 3 meses y medio, iniciando las últimas semanas de noviembre finalizando a mediados de marzo llegando a extenderse hasta las primeras semanas de abril. En estos meses temperatura máxima promedio diario es inferior a 1 °C. El mes más frío del año en Gatineau es enero, con una temperatura mínima promedio de -15 °C y una temperatura máxima de -5 °C. Sin embargo por efectos de viento y/o humedad, la sensación térmica que se percibe puede ser inferior o superior a la temperatura promedio exterior. La siguiente gráfica 1.1 corresponde a esta noción de la temperatura a lo largo del día durante todo el año.

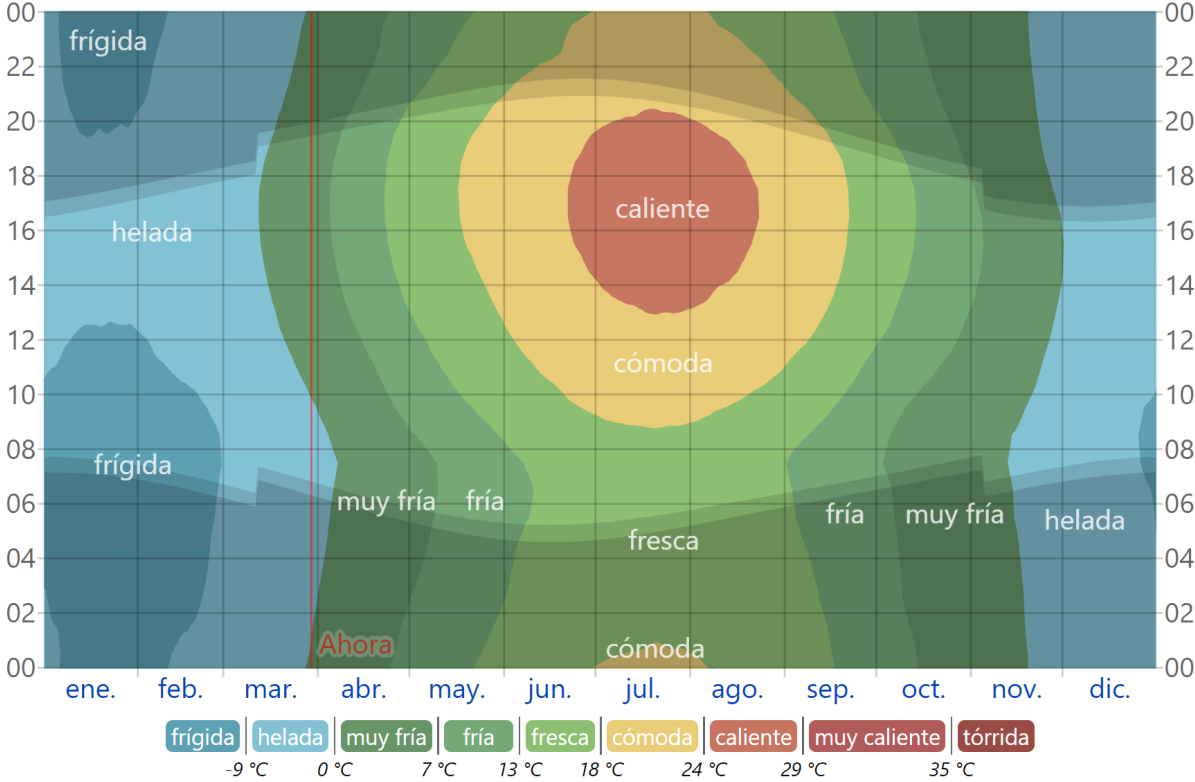


Figura 1.1: Sensación térmica por hora en Gatineau

Los colores figura anterior 1.1 indican la temperatura correspondiente a la sensación térmica en colores. frígida (medición real inferior a -9 °C) hasta tórrida/sofocante (medición real superior a 35 °C), se superpusieron la sombra correspondiente a las horas día y noche típicas en Gatineau a lo largo del año.

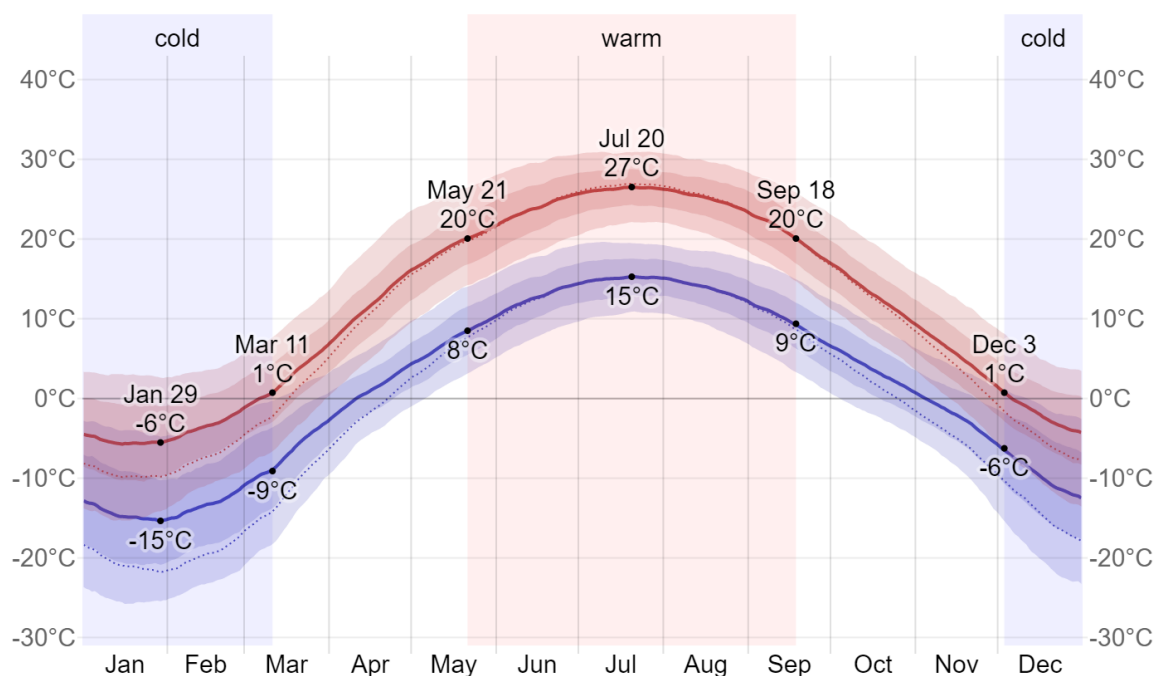


Figura 1.2: Temperatura año típico en Gatineau

Complementando la gráfica 1.1 la gráfica 1.2 de temperaturas mínima y máxima de un año típico en la ciudad de Gatineau: la temperatura mínima promedio se representa de color azul. La línea sólida corresponde a la medición real, la línea punteada a la temperatura que se percibe (usualmente es inferior por efectos de viento y/o incremento en la humedad relativa), las bandas que rodean corresponden al percentil 75% y 90%, tanto a la línea azul, como a la línea roja. Esta última corresponde a la temperatura máxima promedio, la cual también se acompaña con una línea punteada de sensación térmica.

Tabla 1.1: Temperatura superior, promedio e inferior por mes

mes/[°C]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
superior	-6	-3	3	12	19	24	26	25	20	13	5	-2
promedio	-10	-9	-2	6	14	18	21	20	15	8	2	-6
inferior	-15	-13	-7	1	8	13	15	14	9	3	-2	-10

Las temperaturas de un año típico mes de la gráfica 1.2 se condensan en la tabla anterior 1.1

1.1.2. Precipitación

Se define como un día con precipitación cuando se registra al menos un 1.0mm de lluvia o nieve. La probabilidad de precipitaciones varía a lo largo del año en la región de interés. La temporada con mayor registro de precipitación, generalmente lluvia, dura alrededor de 8.5 meses iniciando en abril terminando a mediados de diciembre, en esta época la probabilidad de precipitación es mayor a 29% cada día, lo que es equivalente a que al menos 8 días de cada mes se registre por lo menos un 1.0 mm de precipitación líquida o equivalente. El mes con mayor registro de lluvia es el mes de julio con 11.3 días con al menos 1 milímetros de precipitación registrado. La temporada con menor registro de lluvia en Gatineau es el resto del año, durando 3 meses y medio de mediados de diciembre a inicios de abril. Pues esta época del año se distingue entre los días que solo experimentan lluvia (lluvia gélida o *freezing rain*), nieve sola o mezcla de ambas. Siendo más abundante el registro de nieve.

Tabla 1.2: Días con registro de precipitación al mes en Gatineau

mes/ [d]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Lluvia	0.8	0.9	3.4	7.6	9.7	10.6	11.3	9.8	9.1	9.2	5.4	2.0
Mezclado	1.6	1.3	1.6	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.6	2.4
Nieve	4.8	3.9	2.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	4.3
TOTAL	7.3	6.1	7.6	8.7	9.8	10.6	11.3	9.8	9.1	9.5	8.2	8.7

Los días típicos con precipitación mes por mes se pueden observar en la tabla 1.2 en la que se distingue entre lluvia nieve y mezcla, así como el total en días por mes.

1.1.3. Lluvia

El registro de lluvia está presente en todos los meses del año a diferencia de la nieve que solo se experimenta durante los meses fríos. Las mediciones típicas se registran a continuación en la tabla 1.3 y se visualizan en la gráfica 1.3

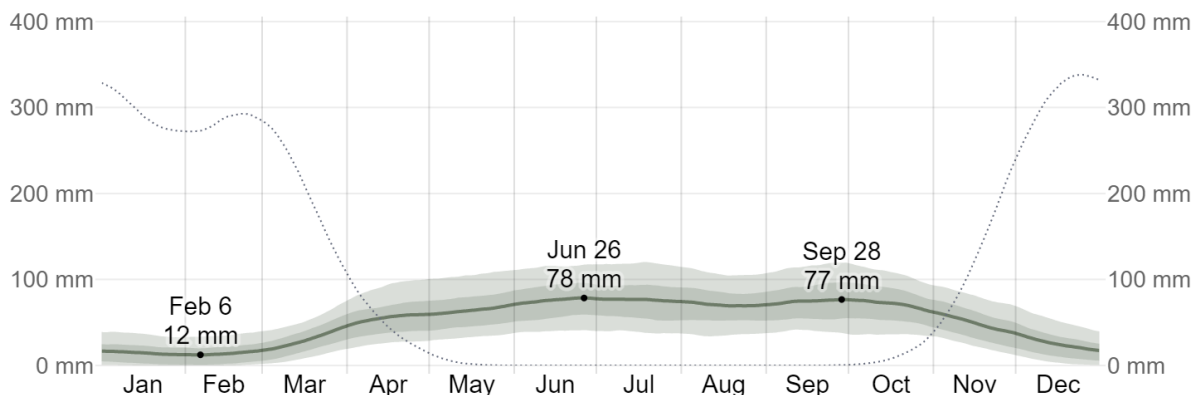


Figura 1.3: Milímetros acumulados de lluvia promedio mensual en Gatineau

La precipitación de solo lluvia promedio acumulada se representa con la línea sólida color negro con bandas de percentil a 75% la más oscura y 90% la más clara. La línea punteada delgada es la nevada promedio correspondiente al día del mes.

Tabla 1.3: Milímetros acumulados de lluvia media mensual en Gatineau

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Lluvia [mm]	14.6	13.3	28.7	56.0	64.1	77.8	79.9	69.8	77.2	72.4	50.0	24.5

1.1.4. Nieve

Como se mencionó el periodo en el que nieva en Gatineau es más corto, sin embargo, la diferencia de milímetros acumulados es drásticamente superior en comparación con la acumulación promedio de lluvia mensual. El periodo con presencia de nieve (sola o en mezcla) es de casi 6 meses, entre los últimos días de octubre y la última semana de abril. El mes que más acumula nieve en el año es diciembre, donde típicamente se registran 338 mm, la acumulación total de nieve en el año típicamente supera los 10 metros con facilidad.

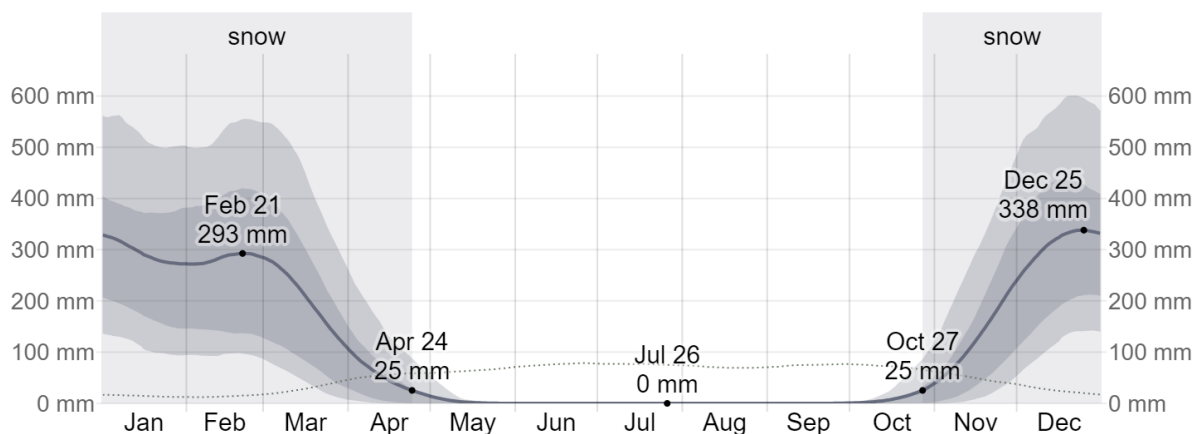


Figura 1.4: Milímetros acumulados de nieve en promedio por mes en Gatineau

La nieve acumulada en mm representada por la línea continua color negro con bandas de percentil a 75 (oscura) y a 90 (clara). La línea punteada delgada es la precipitación promedio correspondiente.

Tabla 1.4: Milímetros acumulados de nieve en promedio por mes en Gatineau

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Nieve [mm]	290.0	293.6	209.2	46.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	118.2	338.1

1.1.5. Duración de día

La duración del día en Gatineau varía considerablemente durante el año. El día más corto es el 21 de diciembre (solsticio de invierno), con 8 horas y 42 minutos de luz; de forma contraria el día más largo es el 21 de junio (solsticio de verano), con 15 horas, 41 minutos de luz diurna aproximadamente como es posible observar en la figura siguiente 1.5.

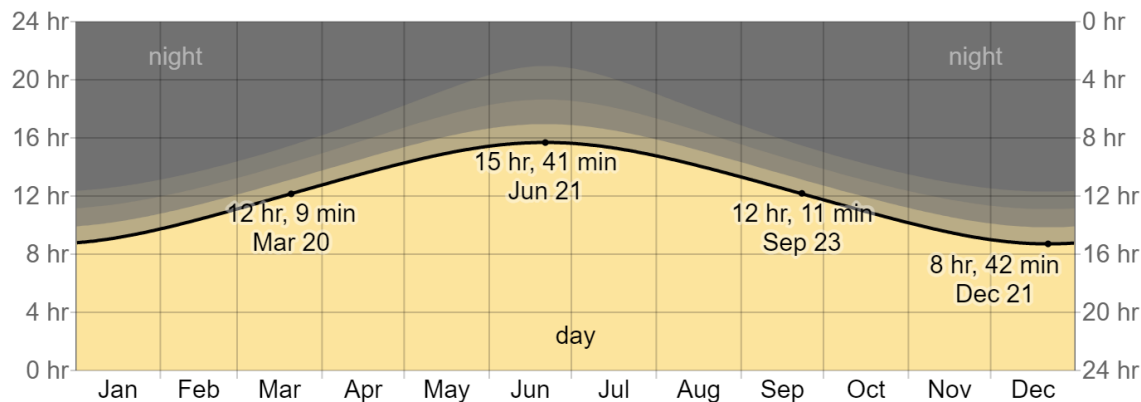


Figura 1.5: Número de horas de luz solar en Gatineau

El número de horas durante las cuales el Sol es visible se representa por la línea negra (se describe a detalle en la tabla 1.5). Por debajo de dicha línea, de color amarillo intenso, se indica plena luz del día. por en arriba de amarillo tenue a gris, las bandas de color indican: crepúsculo (civil, náutico y astronómico) y plena noche.

Tabla 1.5: Número de horas de luz solar en Gatineau

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Luz visible [h]	9.2	10.4	12.0	13.6	14.9	15.6	15.2	14.0	12.5	10.9	9.5	8.8

El amanecer más temprano es a las 5:13 a. m. el 16 de junio y el amanecer más tardío es 2 horas y 33 minutos más tarde a las 7:46 a. m. el 4 de noviembre. La puesta del sol más temprana es a las 16:19 el 10 de diciembre, y la puesta del sol más tardía es 4 horas y 36 minutos más tarde a las 20:55 el 26 de junio, como se aprecia en la siguiente figura 1.6

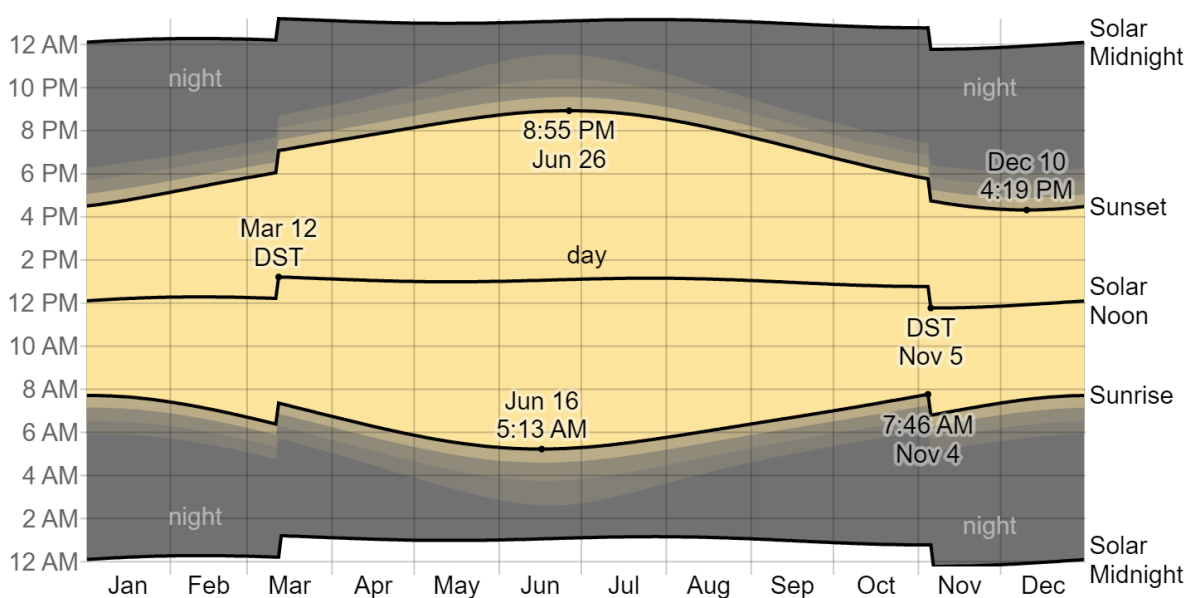


Figura 1.6: Salida y puesta del sol a lo largo del año en Gatineau

De abajo hacia arriba, las líneas negras son la medianoche solar anterior, el amanecer, el mediodía solar, la puesta del sol y la medianoche solar siguiente. El día, los atardeceres (civil, náutico y astronómico) y la noche se indican mediante bandas de color que van del amarillo tenue al gris. Las transiciones hacia y desde el horario de verano se indican mediante las etiquetas “DST”.

1.1.6. Recurso Solar

Esta sección analiza la energía solar incidente diaria total que llega a la superficie del suelo, teniendo en cuenta las variaciones estacionales en la duración del día, la elevación del Sol sobre el horizonte y la absorción por las nubes y otros elementos atmosféricos.

La energía solar incidente diaria promedio experimenta una variación estacional extrema a lo largo del año; el período con mayor recurso solar [$\frac{kWh}{m^2}$] en el año dura 3.5 meses, del 5 de mayo al 21 de agosto, con una energía promedio por m^2 superior a $5.6 kWh$. En este periodo en junio se alcanza el máximo de aportación solar, con una media de $6.5 kWh$. El período más obscuro del año dura 3.4 meses, del 28 de octubre al 11 de febrero, correspondiente al invierno, con un promedio de energía por metro cuadrado de menos de $2.3 kWh$ alcanzando el punto más bajo en diciembre, con un promedio de $1.2 kWh$.

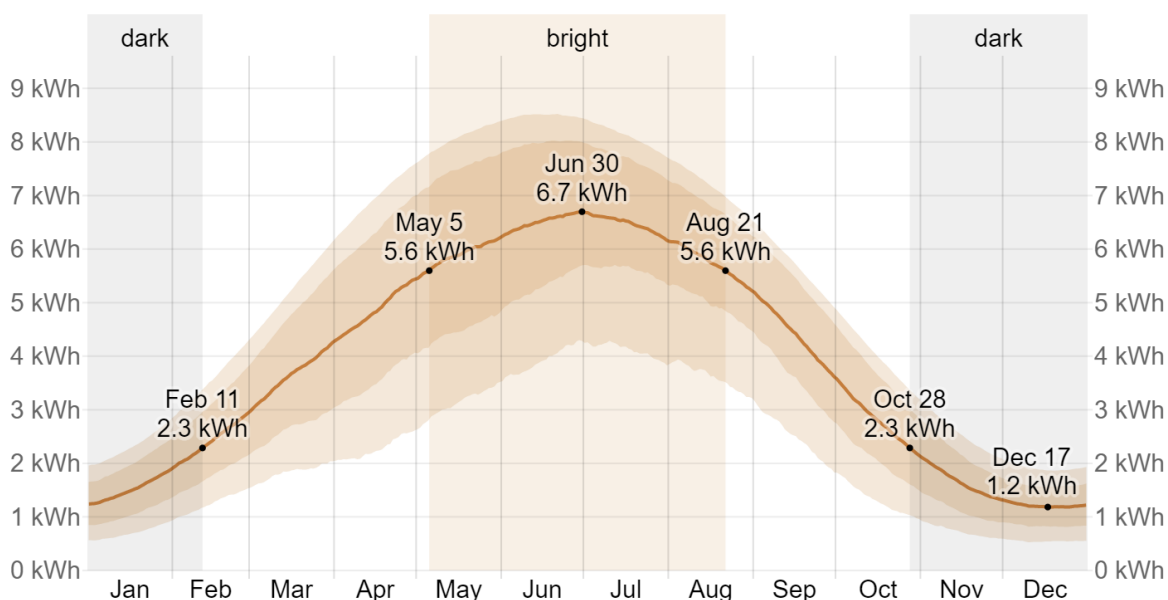


Figura 1.7: Promedio diario de energía solar incidente en Gatineau

La energía solar diaria promedio que llega al suelo por metro cuadrado en la gráfica 1.7 se representa con la línea naranja, con bandas de percentil 75 % y 90 %.

Tabla 1.6: Promedio diario de energía solar irradiante en Gatineau

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Recurso Solar [kWh/m^2]	1.5	2.4	3.7	4.9	5.9	6.5	6.5	5.7	4.4	2.8	1.6	1.2

Los datos presentados conforman una breve descripción del clima en la ciudad donde se encuentra la Sede UNAM-Canadá. A continuación, se describirán los conceptos básicos de la certificación LEED.

1.2. Certificación LEED

Las certificaciones LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) son un sistema de evaluación y certificación de edificios sustentables, creado por el *U.S. Green Building Council* (Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos). Existen cuatro niveles de certificación. Para el caso de la escuela de extensión en Canadá de la UNAM, los créditos que se evalúan son de **operación y mantenimiento (O+M)** para edificios existentes. Acorde a los puntos alcanzados se pueden obtener se los siguientes niveles

- Certificado, se obtiene al alcanzar entre 40 a 49 créditos.
- Plata, obtiene este nivel alcanzar entre 50 a 59 créditos.
- Oro, obtiene este nivel alcanzar entre 60 a 79 créditos totales en proceso de auditoría.
- Platino, este nivel se alcanza con 80 y más créditos totales en proceso de auditoría siendo el máximo y más prestigioso grado obtenible de la certificación.

El proceso para alcanzar alguna de los niveles anteriores, comienza con el cumplimiento de ciertos prerrequisitos que se pautan en las guías de la certificación LEED, los que se abordan a continuación.

1.2.1. Prerrequisitos de evaluación

Los prerrequisitos para obtener una certificación LEED hacen referencia a las características mínimas que debe cumplir la edificación a auditar. Estos son:

1. La ubicación del edificio donde se encuentra el proyecto, debe ser permanente ubicado en un terreno existente con el tipo de uso de suelo adecuado.
2. El tamaño mínimo de la edificación debe ser $> 93m^2$ de superficie lo que equivale a 1000 pies cuadrados de superficie bruta en este sistema de clasificación (operación y mantenimiento O+M).

3. Se deben establecer límites razonables en cuanto al perímetro que se incluirán dentro del proyecto (las especificaciones se encuentran en [20])

Los prerrequisitos anteriores se establecen ya que la certificación LEED está diseñada para evaluar edificios, espacios, vecindarios, comunidades y/o ciudades en el contexto de su entorno. Definir la ubicación, el tamaño y los bordes de cada proyecto guardan como intención evaluar con el mayor grado de precisión posible.

Una vez cubiertos los prerrequisitos, continúa el proceso de auditoría evaluando los créditos de cada categoría que se presentará en la siguiente subsección.

1.2.2. Categorías de evaluación

A continuación, se presentan las categorías que se evalúan en la certificación LEED:

1. **Localización y Transporte (14 pts):** busca fomentar prácticas sustentables en la selección de sitios y en la movilidad de los ocupantes del edificio para reducir los impactos ambientales fomentando el uso de transporte público, el ciclismo o caminar, y la reducción del uso de vehículos privados.
2. **Sitios sustentables (4 pts):** incluye aspectos como la selección del sitio, la gestión de aguas pluviales, el transporte sostenible y la reducción de la contaminación lumínica.
3. **Eficiencia en el uso del agua (15 pts):** se centra en la reducción del consumo de agua potable en edificios a través de la utilización de tecnologías de bajo flujo, sistemas de recolección y reutilización de aguas pluviales y la optimización del uso de agua en el paisajismo.
4. **Energía y atmósfera (35 pts):** se enfoca en la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se evalúa el rendimiento energético, la optimización energía renovable y la calidad del aire interior.
5. **Materiales y recursos (9 pts):** se centra en la selección de materiales sustentables, la reducción de los residuos y la promoción del reciclaje y la reutilización. Se evalúa la gestión de residuos de construcción y demolición, la elección de materiales de bajo impacto ambiental y la optimización del ciclo de vida de los materiales.
6. **Calidad ambiental interior (22 pts):** se enfoca en la promoción de un ambiente interior saludable y cómodo para los ocupantes del edificio. Se evalúa la calidad del

aire interior, el control de la humedad y la temperatura, la iluminación natural y la acústica.

7. **Innovación en el diseño (1 pts):** se fomenta la incorporación de prácticas innovadoras en el diseño y construcción de edificios sustentables. Se evalúan soluciones creativas y estrategias innovadoras que no se toman en cuenta en las otras categorías.

Para el alcance de esta investigación centramos la atención en las categorías de créditos de **Energía y atmósfera** y **Calidad ambiental interior**. El total de puntos alcanzables en las 7 categorías anteriores es de 100 puntos. Existe una categoría adicional. Esta es la categoría permite a los proyectos obtener créditos adicionales al cumplir con criterios específicos que abordan los desafíos ambientales y sociales únicos de la región donde se encuentra el proyecto. Estos criterios se definen en función de las necesidades y preocupaciones ambientales y sociales de la región. Esta es la categoría es **Prioridad Regional** diseñada para fomentar la implementación de prácticas y estrategias que promuevan la sustentabilidad local y mejoren la calidad de vida de las comunidades locales.

1.3. Sustentabilidad en edificios, Canadá

En Canadá, las edificaciones son responsables de cerca del 50 % de total del uso de electricidad, 35 % de la emisión de gases de efecto invernadero y de 15 % del consumo de agua. Las universidades canadienses tienen un promedio de uso de energía de 2.59 GJ/m^2 por año, 68 % más en comparación al porcentaje de las edificaciones comerciales e industriales. [13, 17]

En esta sección, explicaremos algunos conceptos relevantes para nuestro objetivo de esbozar estrategias para alcanzar una edificación sustentable en la sede UNAM-Canadá. Abordaremos el tema de acondicionamiento energético profundo (*Deep Energy Retrofit*, DER) en la subsección 1.3.1.

1.3.1. ¿Qué es el DER?

El concepto de *Deep Energy Retrofit* (DER) se utiliza actualmente de forma generalizada en todo el mundo, a pesar de ello, no existe una definición global establecida de este término. La Agencia Internacional de Energía en su Programa de Energía en Edificios y Comunidades (IEA-EBC) propuso la siguiente definición:

“El Deep Energy Retrofit (DER) es un importante proyecto de renovación de edificios en el

que la intensidad del uso de la energía en el sitio se ha reducido al menos 50 % con respecto al consumo anterior a la renovación, mejorando así el confort y la calidad del ambiente interior.”[24]

La literatura sugiere que llevar a cabo un proyecto *DER* es más fácil de realizar en climas en los que predomina el uso de calefacción, en los enfriamiento al interior no es deseable o necesario y los usuarios del edificio pueden tolerar aumentos temporales de la temperatura del aire interior (hasta 25 °C/77 °F). Se requiere un enfoque integral para el análisis del edificio al aplicar una modificación energética profunda. En otras palabras se debe considerar al edificio del proyecto *DER* como un **sistema único e integrado** ya que analizar cada espacio o aspecto que lo componen como sistemas independientes, limita identificar las relaciones entre, por ejemplo, la envolvente del edificio, los sistema HVAC, el funcionamiento del edificio, etc. El congregar varias disciplinas bajo este enfoque integral en los estudios iniciales a las problemáticas de la edificación permite identificar soluciones con múltiples beneficios en cascada, logrando al modificar un parte del edificio o una practica de consumo de energía impactar en múltiples sistemas.

Una de las clasificaciones de las modificaciones va acorde al tamaño de la modificación que se llevará a cabo

- Renovación Mayor, esta se define como una modificación donde el costo excede el 25 % del valor de la edificación. También entendida como una modificación que involucre más del 25 % de la superficie de la edificación.
- Renovación Menor, costo menor al 25 % del valor o superficie del edificio.
- Sustitución de equipos HVAC, sistemas mecánicos o eléctricos.

Parte de la clasificación anterior puede se encontrar en [24]. El realizar una renovación mayor puede tener como objetivo, prolongar la vida útil de la edificación, la adaptación a nuevos códigos o normativas que se han actualizado y en las condiciones previas a la renovación existe un incumplimiento a estos, para remediar de problemas ambientales como moho u hongos en algún espacio del edificio, para mejora del confort lumínico, térmico o de la calidad de aire al interior o sencillamente aumentar el valor monetario de la edificación. Cual sea que sea el objetivo es preferible realizar estudios para determinar la validación técnica, económica, social y ambiental al realizar una modificación de esta envergadura.

La tabla 1.7 presentada a continuación, es una síntesis de las clasificación y descripción de las modificaciones (menores o mayores) que se realizan a un edificio.

Tabla 1.7: Conjunto de tecnologías básicas para DER. Traducción libre de [24]

Categoría	Modificación
Envolvente	Aislamiento del techo
	Aislamiento del suelo
	Aislamiento de paredes
	Cambio de ventanas
	Cambio de puertas
	Crear hermeticidad
	Impermeabilización con Barreras de Vapor
	Remediación de Puentes Térmicos
Control en la envolvente	
Iluminación y Sistemas Eléctricos	Diseño y control en iluminación
Sistemas de Calentamiento	Sistemas de aire exterior dedicados (DOAS)
Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC)	Subir rendimiento en motores, ventiladores calentadores o enfriadores
	Aislamiento de tuberías
	Aislamiento de ductos
	Hermeticidad en ductos

El escoger la modificación que se realizará, como solución a un problema o simplemente para el aumento de la eficiencia o búsqueda de la sustentabilidad en cualquier proyecto se determina por un proceso de diagnóstico el cual se conoce como auditoría. Así la información presentada hasta ahora se vincula a continuación con la auditoría que se realizó a la Sede, la cual involucra, inspecciones visuales, identificación de hábitos de consumo y usos de la energía, mediciones, revisión de fichas técnicas, estándares, guías, manuales, y/o normativas, etc.

Capítulo 2

Auditoría del edificio

En este capítulo se describen las principales características de la Sede. Se comienza con las dimensiones y distribución de los espacios al interior, continuando con la caracterización de los materiales de los muros de la envolvente, agrupando información indispensable para labores de simulaciones energéticas del edificio con una tabla de propiedades termofísicas (Tabla 2.2). Se aborda el estado actual de los equipos HVAC presentes en el edificio analizando el cumplimiento de los requerimientos establecidos por estándares canadienses e internacionales para sistemas de climatización. Se presentan datos del consumo energético típico anual, se definen los horarios y ocupación de la misma forma que establece la guía *LEED v4.1* [10]. Finalmente se presenta el desarrollo del monitoreo de calidad del aire al interior del edificio.

2.1. El edificio UNAM-Canadá

El recinto de la UNAM-Canadá, construido en 1983. Entró en actividades en 1995, es una edificación rectangular asentada en el barrio de Hull en la ciudad de Gatineau, QC. Los bordes de $45m \times 15m$ delimitan el terreno del edificio, hermético, acondicionada para soportar las bajas temperaturas del invierno canadiense. Actualmente se compone por diferentes espacios, entre oficinas, aulas de clases, salas de juntas, etc., distribuidos en 3 pisos; planta baja primer piso y sótano. La distribución completa se puede apreciar en la tabla siguiente (Tabla 2.1). La orientación del edificio es de norte a sur por el eje más largo y de este a oeste por el eje más corto. Cuenta con un área efectiva en el tejado de aproximadamente $600 m^2$, una superficie bruta total de $1,462.2 m^2$ y un volumen de $4,465.94 m^3$ 7.7

Tabla 2.1: Distribución de los espacios en la sede UNAM-Canadá

PRIMER PISO	PLANTA BAJA	SÓTANO
Acceso Techo	Ascensor PB	Ascensor S
Ante Baño Dirección	Aula 109	Aula 014
Ante Dirección	Aula 110	Aula 015*
Ascensor P1	Aula 111	Cuarto De Máquinas
Aula 208*	Aula 112	Escaleras Oeste S
Aula 209	BañoH PB	Escalera Sur S
Aula 210	BañoM PB	Oficinas Sótano
Aula 211	Bebederos PB	Pasillo S
Aula 214	Biblioteca*	Ropero Sótano
Aula 215*	Bodega Sor Juan	Cuarto de Servidor
Baño Dirección	Entrada Principal	
BañoH P1	Escaleras Oeste PB	
BañoM P1	Escalera Sur PB	
Bebederos P1	Oficina Recepción	
Bodega Oficinas	Pasillo PB	
Cafetería*	Recepción*	
Dirección*	Sala De Profesores	
Escaleras Oeste P1	Sala Sor Juan*	
Escalera Sur P1	Salida Emergencia Norte PB*	
Oficinas Cubículos*		
Pasillo P1		
Salida Emergencia Norte P1		

Los nombres y distribución corresponden con ciertas zonas térmicas del archivo *SketchUp* del edificio.

* Monitor de CO_2

2.1.1. Materiales de la envolvente

Conocer los materiales de la envolvente del edificio es esencial para llevar a cabo una auditoría de sostenibilidad/energética completa y precisa en el edificio de la UNAM-Canadá, ya que permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética, reducir el impacto ambiental y garantizar la seguridad y la salud ocupacional de las personas que trabajan o hacen uso en las instalaciones. Entre las razones por las que se encuentra importante conocer los materiales del edificio se determinamos las siguientes:

1. Análisis de eficiencia energética: Los materiales de la envolvente pueden afectar significativamente el rendimiento energético de un edificio, especialmente en términos de aislamiento térmico y control de la radiación solar. Conocer los materiales de la envolvente ayuda a identificar posibles mejoras en la eficiencia energética del edificio.

2. Evaluación de impacto ambiental: Los materiales de construcción pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente, tanto durante la extracción, fabricación y transporte de los mismos como durante su uso en el edificio. Conocer los materiales de la envolvente ayuda a evaluar el impacto ambiental del edificio y a identificar oportunidades para reducir este impacto.
3. Seguridad y salud ocupacional: Algunos materiales de construcción pueden contener sustancias tóxicas o peligrosas, por lo que es importante conocer los materiales de la envolvente para garantizar la seguridad y la salud ocupacional de las personas que trabajan o habitan en el edificio.

La información se recabó de los planos disponibles del edificio donde muestran los materiales, ubicación y medidas que componen los muros del edificio. Las propiedades termofísicas de los diferentes materiales presentes en la construcción se condensan en la tabla 2.2. Esto con el objetivo de facilitar, a futuras investigaciones/trabajos, los valores de dichas propiedades para realizar simulaciones energéticas en *EnergyPlus* [19]. Algunas de las propiedades termofísicas más comúnmente utilizadas son:

- **Conductividad térmica:** $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ mide la capacidad de un material para transmitir el calor. Se utiliza para calcular las transferencias de calor a través de paredes, techos, pisos y ventanas.
- **Densidad** $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$: mide la masa de un material por unidad de volumen. Es importante para determinar la capacidad térmica de los materiales y su respuesta al cambio de temperatura.
- **Calor específico** $c \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$: mide la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de una unidad de masa de un material en una unidad de temperatura. Es importante para determinar la capacidad térmica de los materiales y su respuesta al cambio de temperatura.
- **Coefficiente de Absorción Térmica TAC:** es una medida de la capacidad de un material para absorber energía térmica. Es la fracción de energía térmica incidente en el material que es absorbida por el mismo. se expresa como un valor entre 0 y 1, donde 0 indica una falta de capacidad de absorción térmica y 1 indica una capacidad de absorción térmica completa.
- **Coefficiente de Absorción solar SAC:** es la fracción de radiación solar incidente que es absorbida por un material. Esta propiedad es importante en la evaluación del

rendimiento térmico de los edificios, ya que un material con una alta absorción solar puede aumentar la cantidad de calor absorbido por un edificio y, por lo tanto, afectar su carga térmica y su consumo de energía. El coeficiente de absorción solar se expresa como un número entre 0 y 1.

Estas propiedades son utilizadas en la definición de los materiales constructivos y en la especificación de las condiciones de contorno para la simulación energética de edificios.

Tabla 2.2: Propiedades termofísicas de los materiales de los muros de la Sede. Obtenido de ¹

Material/ Propiedad Termofísica		Conductividad térmica [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]	Densidad [kg/m ³]	Coefficiente de Absorción Térmica	Coefficiente de Absorción Solar
Acabado acrílico		0.2 - 0.6	1000 - 2000	1000 - 1300	0.9 - 0.95	0.6-0.8
Aislamiento de fibra de vidrio RSI 3.5		0.035 - 0.04	800 - 1200	10-30	-	-
Barrera de aire Tyvek (HDPE) RSI 3.5		0.03	1920	42	0.9	0.6
Escudo de vapor	<i>Polietileno de alta densidad (HDPE)</i>	0.36	1800 - 2100	940 - 970	0.01 - 0.1	0.01-0.2
	<i>Polipropileno</i>	0.15 - 0.24	1800 - 2200	900 - 960	0.01 - 0.1	0.05 - 0.2
Panel de Hormigón ligero		0.43	920	1600	0.5 - 0.9	0.1 - 0.6
Revestimiento de Bloque Arquitectónico	<i>Piedra Natural</i>	1.4 - 7.0	800	2600	0.02 - 0.1	0.2 - 0.6
	<i>Vinilo</i>	0.14 - 0.17	1500	1400	0.02	0.1 - 0.4
	<i>Estuco</i>	0.5 - 0.9	1000	1600	0.05 - 0.2	0.2 - 0.5
	<i>Paneles compuestos de aluminio</i>	170	900	2700	0.02	0.6
Revestimiento Ladrillo		0.33 - 1.15	840	2000	0.05 - 0.2	0.3 - 0.5
Yeso		0.16	830 - 840	800 - 960	0.6 - 0.9	0.4
Yeso tipo X		0.19 - 0.25	836 - 880	1050	0.6 - 0.7	0.4

¹Fuentes [5, 7, 21, 15, 18, 19]

2.1.2. Equipos de calefacción, ventilación o aire acondicionado (HVAC)

Según la clasificación de climas de la *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers)*, en el estándar 90.1 [3], la ciudad de Gatineau se encuentra en la Zona Climática 6B. Caracterizándose por inviernos muy fríos y veranos cálidos. Como se presentó con anterioridad, las temperaturas extremas pueden variar desde -29°C hasta 33°C . Esta información es útil para determinar los requisitos de acondicionamiento térmico de los edificios en esta ciudad, siendo los sistemas de calefacción esenciales en invierno, mientras que los sistemas de aire acondicionado son importantes durante los meses de verano para garantizar la comodidad y la seguridad de los ocupantes de los edificios. En concreto este estándar indica un par de parámetros de gran relevancia para la selección y el diseño de los sistemas HVAC:

- **HDD18:** Este término hace referencia a la cantidad de grados-día Celsius (o Fahrenheit) por debajo de una temperatura de referencia de 18°C (o 65°F) en un determinado lugar durante un período determinado, generalmente un año. Este valor se utiliza como una medida de la cantidad de energía que se requerirá para mantener una temperatura interior confortable en los edificios durante la temporada de calefacción. Cuanto mayor sea el valor de HDD18, mayor será la cantidad de energía necesaria para la calefacción el edificio.
- **CDD10:** Este parámetro, de manera similar, refiere a la cantidad de grados-día Celsius (o Fahrenheit) superior de una temperatura de referencia de 10°C (o 50°F) en un determinado lugar durante un período determinado, generalmente un año. Este valor se utiliza como una medida de la cantidad de energía que se requerirá para mantener una temperatura interior confortable en los edificios durante la temporada de refrigeración. Cuanto mayor sea el valor de CDD10, mayor será la cantidad de energía necesaria para enfriar el edificio.

Los valores para la ciudad de Gatineau son **HDD18** = 4762 y **CDD10** = 1136 Para cubrir este requerimiento, en este mismo documento se establece que los sistemas de calefacción deben diseñarse a una temperatura de $T_{des,cal} = -25^{\circ}\text{C}$ cubriendo el 99.6% de las condiciones meteorológicas típicas en cuanto a temperaturas mínimas. De igual manera se indica que los sistemas de enfriamiento deben diseñarse para valores de temperaturas para enfriamiento bulbo seco y húmedo de $T_{des,enf,dry} = 28^{\circ}\text{C}$, $T_{des,enf,wet} = 21^{\circ}\text{C}$ estos valores se utilizan para asegurar que pueda satisfacer las necesidades de refrigeración del edificio durante las

condiciones de máximo calor. La sede cuenta con 2 equipos para regular la temperatura al interior del edificio:

1. Sistema de calefacción de 2 calentadores que están diseñado para instalación en interiores, ubicado en el sótano. Modelo **HH 0325C** son calderas de gas natural fabricada por la compañía *Teledyne Laars*. Las especificaciones de la ficha técnica indica [14]:
 - Tipo de combustible: gas natural
 - Capacidad máxima de producción de calor: 325,000 BTU/h ($\sim 95 kW$)
 - Tasa mínima de producción de calor: 162,500 BTU/h ($\sim 48 kW$)
 - Eficiencia térmica: 80 %
 - Dimensiones: 30" (0.76 m) de ancho \times 45,5" (1.16 m) alto \times 50,5" (1.28 m) de profundidad
 - Peso: 535 libras
 - Requiere un suministro eléctrico de 115 V/60 Hz menos de 12 A

Por el número de serie (**A96CG0030**) se puede saber que el año de manufacturación de los equipos es 1996, así que estos equipos han operado por más de 27 años. Este sistema, tras calentar el agua en la caldera, la transporta a través de tuberías hasta los radiadores ubicados en todo el edificio. Estos emiten calor aumentando la temperatura del aire de los diferentes espacios. A medida que el aire se calienta, comienza a circular por la habitación y a elevar la temperatura ambiente. El agua caliente regresa a la caldera a través de tuberías para comenzar el ciclo nuevamente. La temperatura de agua está ajustada para alcanzar una temperatura de 137 °F ($\sim 58^\circ C$). El uso que suelen tener en el edificio en cuanto a la configuración de los termostatos no es eficiente ya que, en temporadas de ocupación, se determinó por medio de una inspección visual en el edificio que el *setup* en la mayoría de los espacios rondaba ente 25-30°C superando la temperatura de confort, propiciando, también, que la humedad en el aire se encuentre drásticamente en niveles inferiores a los óptimos para el desarrollo de actividades académicas (esto se verá a mayor detalle en próximas secciones). Además de esto el *Código nacional de energía de Canadá para edificios* en la *división B 5^{ta} parte Tabla 5.2.12.1*. [9] indica que para equipos calentadores a gas con una capacidad entre 300,000 y 2,500,000 BTU/h el requisito mínimo de eficiencia para el equipos instalados en Gatineau debe ser de una eficiencia térmica $E_c \geq 83.0\%$

2. El segundo equipo para controlar la temperatura del edificio está instalado en el exterior exactamente en el tejado. Se trata de una unidad de paquete de aire acondicionado modelo **YCD180B3LC** [23] de la marca *York*, la cual es fabricada por *Johnson Controls*.

BRAND	Y	Y = York
PRODUCT TYPE	C	C = Air Conditioner
NOMINAL SERIES EFFICIENCY AND STAGING	D	D = 13 SEER / 1-Stage (US Northern Region)
NOMINAL UNIT CAPACITY (MBH)	36	18 = 1.5 Ton 42 = 3.5 Ton 24 = 2 Ton 48 = 4 Ton 30 = 2.5 Ton 60 = 5 Ton 36 = 3 Ton
REFRIGERANT	B	B = R-410A
VOLTAGE (Voltage-Phase-Hertz)	2	2 = 208/230-1-60
GENERATION (MAJOR REVISION)	1	1 = 1st Gen 2 = 2nd Gen etc
FACTORY OPTION	S	S = Standard (No Options) H = Hard Start Kit
STYLE LETTER (MINOR REVISION) NOT USED FOR ORDERING	A	A = Style A B = Style B etc

Figura 2.1: Nomenclatura del número de modelo de acuerdo a la guía técnica [23]

La guía técnica del equipo, así como la ficha técnica indican los siguientes datos del equipo:

- Capacidad nominal de enfriamiento: 15 Ton
- Eficiencia energética nominal: $SEER = 13$
- Refrigerante: R-410A
- Voltaje/frecuencia/fase: 208/230-60-3
- Tipo de combustible: gas natural
- Temperatura mínima de operación: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Eficiencia térmica: 81 %
- Fecha de fabricación: 08/1996
- Capacidad nominal de producción de calor: 250,000 BTU/h ($\sim 73\text{ kW}$)

- Tasa mínima de producción de calor: 175,000 BTU/h ($\sim 51 kW$)

El *SEER* (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*) es una medida de la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado. Se calcula dividiendo la cantidad de refrigeración producida en una temporada de enfriamiento (medida en BTU o kW) por la cantidad de energía eléctrica consumida en esa misma temporada (medida en kW). Un *SEER* de 13 significa que el sistema de aire acondicionado produce 13 unidades de refrigeración por cada unidad de energía eléctrica consumida durante la temporada de enfriamiento. En Canadá, la regulación de eficiencia energética [12] para equipos de aire acondicionado se establece, acorde al estándar CSA C656-14 *Performance standard for split-system and single-package air conditioners and heat pumps*, que el requisito mínimo de eficiencia para el equipos instalados en Gatineau debe ser de un $SEER \geq 14$ para equipos manufacturados en el periodo a febrero de 1995 y antes de enero de 2023.

2.1.3. Historial de Consumo Energético: Eléctrico y Térmico

Se obtuvieron datos del consumo Eléctrico y Térmico del edificio analizando los recibos de electricidad y de gas de los años 2018 y 2019. Se consideraron estos años para obtener el consumo típico del edificio puesto que, los años 2020 a 2022 el edificio permaneció sin la ocupación y uso común por motivos de la pandemia de COVID-19.

Tabla 2.3: Consumo eléctrico del edificio

Mes/ Electricidad [kWh]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	TOTAL
2018	12,992	9,824	13,234	15,361	12,722	15,687	13,797	11,815	9,155	8,096	8,032	8,312	139,027
2019	12,594	6,208	6,733	8,027	11,515	15,418	19,967	10,326	8,173	7,382	8,502	5,543	120,388
Consumo Medio	12,793	8,016	9,983.5	11,694	12,118.5	15,552.5	16,882	11,070.5	8,664	7,739.	8,267.	6,927.5	129,708

Tabla 2.4: Consumo de gas del edificio

Mes/ Gas [m3]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	TOTAL
2018	2,778	2,628	2,065	1,605	574	8	6	0	0	14	828	1,508	12,014
2019	2,125	2,532	2,612	1,999	1,446	1,041	6	0	0	17	275	2,005	14,058
Consumo Medio	2,451.5	2,580	2,338.5	1,802	1,010	524.5	6	0	0	15.5	551.5	1,756.5	13,036

Considerando la información proporcionada por el proveedor acerca del poder calorífico del gas natural que suministran a la sede de $38.44 MJ/m^3$, obtenemos fácilmente la

conversión de metros cúbicos a energía neta, un total de $501,103.84 \text{ MJ} \approx 501.10 \text{ GJ}$ de energía neta térmica. De forma similar se calcula la energía eléctrica neta consumida, recordando que kWh equivale a $3,600 \text{ kJ}$, lo que anualmente equivale a un consumo de $466,948,800 \text{ kJ} \approx 466.95 \text{ GJ}$ eléctricos. Debido a que la superficie bruta total del edificio es igual a $1,465.2 \text{ m}^2$. El uso de energía promedio de la sede es igual a 0.66 GJ/m^2 por año. Se mencionó en la sección 1.3 que el uso promedio anual de energía por las universidades canadienses corresponde a 2.59 GJ/m^2 . En contraste con esto, la Sede UNAM-Canadá tiene un consumo 74.6% inferior al promedio de las universidades en Canadá.

2.1.4. Horarios y Ocupación

Las horas de funcionamiento semanales (hfs) del edificio corresponde al número total de horas a la semana en las que la mayoría de los ocupantes del edificio están presentes y/o cuando el edificio está abierto para funcionamiento. Estas se ponderan en función del espacio y se calculan mediante la ecuación:

$$hfs = \sum \frac{hfs \text{ por espacio} \times \text{superficie bruta del espacio}}{\text{superficie bruta total}} \quad [10] \quad (2.1)$$

La Superficie bruta total del edificio es de $1,465.2 \text{ m}^2$ con 10 horas de funcionamiento por día (50 por semana) existe un servidor en el sótano, la superficie del espacio donde se halla es 8.26 m^2 , este funciona las 24 h del día. Por lo tanto, las horas de ocupación semanales del edificio son

$$hfs = \sum \frac{(50 \text{ h})(1,465.2 \text{ m}^2 - 8.26 \text{ m}^2) + (168 \text{ h})(8.26 \text{ m}^2)}{1,465.2 \text{ m}^2} \simeq 51 \text{ h/sem} \quad (2.2)$$

La ocupación del edificio se entiende como la media diaria de usuarios del edificio en un día típico de funcionamiento. Para esto se han identificado 2 escenarios de ocupación

1. **Cursos Puma:** Tres veces al año durante 3 semanas la sede realiza esta actividad en la que la ocupación se considera *máxima* ya que la Sede ha recibido hasta 250 usuarias(os) (entre estudiantes, profesores, profesoras, personas que trabajan permanentemente) por día.
2. **Nominal:** El resto del año el edificio es ocupado por personas que laboran en el edificio y un día a la semana se imparten cursos para grupos entre 6 y 15 personas. Estos últimos tienen una duración de aproximadamente 2 horas.

La importancia de conocer los horarios de funcionamiento semanales y a ocupación del edificio radica en que esta información es tomada en como prerequisite en varias categorías de la certificación LEED (Transporte, Uso de agua, Energía y Gestión de Residuos). Utilizando las ecuaciones de [10] para calcular la ocupación, tenemos que el total de ocupantes por día existen los siguientes escenarios

Para un día común con 15 trabajadores en el edificio 10 horas por día y un grupo 15 personas 2 h un día a la semana;

$$\frac{150 \text{ h laboradas}}{10.2 \text{ hfs}} + \left(\frac{15}{10.2 \text{ hfs}} \times 2 \text{ h visita} \right) / 5 \text{ d} \simeq 15.3 \quad (2.3)$$

El total de usuarios del edificio al día en este escenario es de 15 personas

En semanas de cursos puma de 120 a 250 estudiantes con clases de 9 a.m a 2 p.m (5 h)

$$\frac{150 \text{ h laboradas}}{10.2 \text{ hfs}} + \left(\frac{120 \text{ a } 250}{10.2 \text{ hfs}} \times 5 \text{ h visita} \right) \simeq 73.5 \text{ a } 137.2 \quad (2.4)$$

Total de usuarios del edificio al día durante este escenario es de 74 a 137 personas.

Hasta este momento se ha cubierto una parte importante de la auditoría del edificio en la categoría de energía. En la consecuente sección introduce la categoría de calidad del aire al interior. Se describe de forma general en que consiste la categoría dentro de la certificación LEED. Además, se discute la importancia del monitoreo y sus implicaciones en la salud de las personas. Se finaliza exponiendo la metodología empleada para el análisis de la calidad de aire de la Sede.

2.2. Monitores de CO_2 , Temperatura y Humedad relativa

Una de las categorías de evaluación en la certificación LEED es la calidad del aire interior. En esta se evalúan diferentes parámetros como:

- Tasa de ventilación: Se evalúa la cantidad de aire fresco que se suministra al espacio por unidad de tiempo para asegurar que se mantengan niveles adecuados de oxígeno y se reduzcan los niveles de contaminantes del aire interior.
- Contaminantes del aire interior: Se evalúa la presencia y concentración de contaminantes específicos del aire interior, como dióxido de carbono (CO_2), compuestos orgánicos volátiles (COV), etc.

- Control de humedad: Se evalúa la capacidad de controlar los niveles de humedad en el espacio, lo que puede contribuir a prevenir el crecimiento de moho y otros microorganismos que pueden afectar la calidad del aire interior y la salud de los ocupantes.
- Sistema de filtración del aire: Se evalúa la eficacia del sistema de filtración del aire para capturar partículas y contaminantes del aire interior y mejorar la calidad del aire.

La evaluación de la calidad del aire interior en los edificios ayuda a asegurar que se estén tomando medidas adecuadas para proporcionar un ambiente interior saludable y cómodo para los ocupantes de los edificios. Al evaluar la calidad del aire interior, se pueden identificar y abordar los problemas de contaminación del aire interior en los edificios. Esto puede ayudar a prevenir problemas de salud, como asma, alergias, irritación de los ojos y la piel, dolores de cabeza, fatiga y otros síntomas relacionados con la exposición a contaminantes del aire. Además, un ambiente interior saludable y cómodo puede mejorar la productividad y el bienestar de los ocupantes de los edificios, lo que puede tener un impacto positivo en la satisfacción, en la reputación y el valor del edificio.

De aquí surge la motivación por monitorear la calidad del aire del edificio por medio de sensores, aunado a esto como se expresa conciso y correcto en [22]: " *El monitoreo de la calidad del aire en espacios cerrados es una de las tareas que nos ha dejado la pandemia del COVID-19 de inicios de la década del 2020.*

...

En el contexto del COVID-19, una de las enseñanzas de los estudios realizados para entender la propagación de la enfermedad indica que el contagio es fundamentalmente por vía aérea. Los virus que se alojan en las pequeñas gotas (gotículas) de las exhalaciones de una persona contagiada son la principal vía de transmisión al ser aspirados por una persona sana. Por esa razón, la inmensa mayoría de los contagios se dan en ambientes cerrados donde la concentración de esas gotículas es alta. Dado que puede haber personas contagiadas que todavía no presenten síntomas o personas portadoras del virus asintomáticas es de vital importancia medir la cantidad de aire que ha sido exhalado por alguna persona posiblemente contagiada en los lugares cerrados. Uno de los productos de nuestra respiración es el CO_2 , así que la proporción de gas de CO_2 en el aire en una habitación donde haya personas es una medida indirecta de la cantidad de aire que ha sido exhalado por estas personas. De similar manera, podemos decir que la concentración de CO_2 es un indicador indirecto de la cantidad

de gotículas que puede haber en esa habitación producto de la respiración de las personas

...

con información se cuenta con herramientas para definir si: permanecer en el lugar o ventilarlo o salir de él."

Según el estándar de la ASHRAE *Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* [2], las concentraciones de CO_2 adecuadas para realizar actividades en aulas de clase no deben superar las 700 ppm (partes por millón) de CO_2 respecto a los niveles de aire exterior sin superar 1000 ppm. Considerando que concentraciones de CO_2 en el aire exterior aceptables suelen oscilar entre 300 y 500 ppm (concentraciones por encima en el aire exterior pueden ser un indicador de combustión y/u otras fuentes contaminantes). Es importante mantener una buena ventilación en las aulas para evitar la acumulación de CO_2 y otros contaminantes en el aire interior. La ventilación adecuada puede lograrse mediante la ventilación natural, el uso de sistemas de ventilación mecánica o la combinación de ambos. Sin embargo, las estructuras de las ventanas en el edificio hacen imposible la ventilación natural, dando como resultado su condición de hermeticidad siendo las UTA's (Unidades de tratamiento de aire) la única herramienta posible para renovar el aire de la Sede.

Los monitores que se ocuparon para evaluar lo anterior se integran básicamente por tres componentes

MagTag: *Mag* es la abreviatura para *magnético*, en el paquete de esenciales de la compañía *Adafruit* se incluye: tres acrílicos, una batería de 3.7 V/420mAh, 4 mini pies magnéticos y la *MagTag* la cual consta de una pantalla de tinta y un módulo inalámbrico ESP32-S2, constituyendo una pantalla WiFi de muy bajo consumo.

Cable JST: Un cable simétrico de poco más de 100mm, equipado con puertos JST-SH hembra en ambos extremos, por lo que no hay que preocuparse de qué lado irá al puerto de sensor y cuál al puerto *MagTag*.

Sensor SCD-30-NDIR de CO_2 : La tecnología que lo compone es de tipo NDIR (Infrarrojo no dispersivo), lo que permite que mida la concentración de CO_2 . Además, incluye un sensor de temperatura y humedad. El intervalo medible de CO_2 es de 400 ppm - 10,000 ppm con una precisión de ± 30 ppm.

La información, el armado y la programación de los sensores se puede encontrar en [22]

2.2.1. Ubicación y Distribución

Para lograr la cobertura total del edificio se instalaron 10 monitores capaces de registrar 2 datos por minuto de

- Concentración de CO_2 en *ppm*
- Temperatura en grados Celsius
- Humedad relativa en porcentaje

Los datos registrados se cargan automáticamente a la nube. Como se observa en la tabla 2.1 se ubicaron 5 monitores en piso 1, 4 en planta baja y 1 en el sótano. La clasificación de los espacios, así como la prioridad para instalar un monitor, estuvo relacionado con la similitud con otros espacios, así como su ocupación, respectivamente.

1. Aula 208: esta aula posee las mismas características que 8 de las 12 presentes en el edificio (209,210,211,109,110,111,112). Cuentan con las mismas dimensiones y todas carecen de ventanas.

$$\text{Área} : 23.3 \text{ m}^2 \quad \text{Volumen} : 71.1 \text{ m}^3$$

2. Aula 215: este espacio comparte las mismas características que el aula 214 en dimensiones, además de cada una tener una ventana y media.

$$\text{Área} : 19.8 \text{ m}^2 \quad \text{Volumen} : 60.4 \text{ m}^3$$

3. Cafetería: es el espacio concurrido con mayor número de ventanas.

$$\text{Área} : 36.5 \text{ m}^2 \quad \text{Volumen} : 111.4 \text{ m}^3$$

4. Dirección: este espacio cuenta con 2 ventanas. Ocupación permanente.

$$\text{Área} : 40.5 \text{ m}^2 \quad \text{Volumen} : 123.3 \text{ m}^3$$

5. Oficinas Cubículos: uno de los espacios con mayor ocupación de usuarios, mayores dimensiones. Cuenta con 5 ventanas. Ocupación permanente.

$$\text{Área} : 182.7 \text{ m}^2 \quad \text{Volumen} : 556.9 \text{ m}^3$$

6. Biblioteca: Este espacio presenta problemas de humedad en las temporadas en las que la calefacción está apagada.

$$\text{Área} : 58.7 \text{ m}^2 \quad \text{Volumen} : 179.0 \text{ m}^3$$

7. Recepción: un espacio en el que una de las paredes completa es un ventanal. Ocupación permanente.

Área : 28.1 m³ *Volumen* : 85.9 m³

8. Auditorio Sor Juan: es el más grande y con mayor densidad de ocupación por ser el auditorio de la sede.

Área : 124.0 m² *Volumen* : 378.0 m³

9. Salida Emergencia Norte: Este espacio se seleccionó de gran interés ya que la calefacción no se enciende, proporcionando datos del comportamiento térmico de la envolvente con el exterior además de ser el único espacio en que se presentan infiltraciones de aire.

Área : 42.1 m² *Volumen* : 128.5 m³

10. Aula 015: una de las 2 aulas del sótano, amabas con las mismas características, así los con como la mayor ocupación en temporadas de cursos en este piso.

Área : 33.6 m² *Volumen* : 102.4 m³

Los pasillos, bodegas, cuartos de máquinas, etc. se descartaron ya que en se consideran como transitorios o con ocupación esporádica.

El capítulo anterior ha puesto de manifiesto la importancia de llevar a cabo una auditoría en las instalaciones de la UNAM-Canadá. Esta evaluación permitió identificar las posibles deficiencias en los sistemas energéticos y de ventilación. Ahora bien, en el siguiente capítulo, se presentarán los resultados detalladamente acerca de los datos obtenidos durante la auditoría, los cuales permitirán tener una visión más clara y precisa del estado actual del edificio y, en consecuencia, esclarecer la prioridad en cuanto a las áreas de oportunidad a mejorar.

Capítulo 3

Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la auditoría del edificio. Se realizó una división de los registros obtenido por a los monitores acorde a los parámetros que midieron los sensores:

- Calidad del aire: en esta parte de la auditoría se presentan las mediciones de *Concentración de CO₂* y *Humedad relativa*. Con los datos de concentración de CO₂ se obtuvo una ecuación empírica que caracteriza el fenómeno de decremento de concentración al interior del edificio, respecto a la última sección se obtuvieron los valores promedio, mínimos y máximos de humedad a lo largo de la temporada invernal, visualizando el efecto de la calefacción en el aire al interior del edificio.
- Energía: en esta subsección aborda el comportamiento térmico del edificio, observando las mediciones de temperatura registradas en espacios en los que la calefacción permaneció encendida todo el tiempo, así como donde permaneció apagada toda la temporada.

Nota: Los resultados correspondientes al monitor instalado en la Salida Emergencia Norte se presentan por separado, debido a que este espacio no estaba encendida la calefacción y su ocupación fue nula teniendo características completamente diferentes a los demás espacios estudiados.

3.1. Calidad del aire al interior

Se analiza a continuación la calidad del aire presente en el edificio en los meses de enero, febrero y marzo. Estos meses coinciden con la estación de invierno, todo el tiempo estuvo

encendida la calefacción y en enero se realizó el invierno PUMA 2023 de forma presencial (escenario de ocupación máxima).

3.1.1. Concentración de CO_2

Del 9 de enero al 27 de enero son las semanas en las que se registran los niveles más altos de Concentración de CO_2 en toda la estación. En la tabla 3.1 puede observarse la concentración mínima y máxima registrada durante en este periodo.

Tabla 3.1: Concentración de CO_2 registrada en temporada de invierno

Espacio	CO_2 [ppm]	
	mín	máx
Aula 015	334	1902
Aula 208	344	3370
Aula 215	355	2698
Biblioteca	360	1488
Cafetería	328	2882
Oficinas/ Cubículos	415	1230
Dirección	351	1365
Recepción	343	1283
Auditorio Sor Juan	369	2375

La concentración más alta de CO_2 se da en el aula de clases 208, seguido de la Cafetería, el Auditorio Sor Juana, el Aula 215 y en quinta posición el Aula 015. Tras ponderar estos valores con el volumen de cada espacio las concentraciones más altas se registraron en las Aulas 208, 215 y 015. Siendo estos espacios, los que presentan la calidad de aire menor durante cada día, en los que los usuarios son estudiante y en los que el tiempo de ocupación del espacio es de más de 5 h, colocándose así como espacios prioritarios en la auditoría.

Observando los datos de los diferentes días en todos los espacios, se determina que

- Tanto el incremento como el decremento de la concentración de CO_2 podría ser representado por un comportamiento exponencial, ya que las primeras horas el ascenso/descenso de la concentración tenía cambios abruptos, conforme pasaba el tiempo estos cambios crecían o disminuían de forma menos acelerada hasta llegar una asíntota.

Esto matemáticamente hablando corresponde con la ecuación 3.1, ya que la concentración de dióxido de carbono promedio en la atmósfera a nivel mundial se aproxima a las 400 *ppm* se colocó esta cota como primer término, β indica una amplitud o el valor inicial (cuando el tiempo $t = 0$, α es la tasa de cambio). [11]

- Las horas de incremento corresponden a las horas de clases, de 9:00 a 14:00
- Las horas de decremento van de 14:00 a 9:00 del siguiente día

La primera observación se comprueba tras ajustar los datos a la ecuación 3.1 obteniendo parámetros estadísticos para las 12 series temporales, correspondientes a los días de clases, $R^2 > 96\%$ para la fase de decremento, como se puede observar en la tabla 3.2.

$$CO_2 = 400 + \beta e^{-\alpha t} \quad (3.1)$$

Tabla 3.2: Coeficientes de ajustes exponenciales a datos de concentración de CO_2

$\alpha \times 10^{-3}$	β	R^2	Datos
5.39	1021.26	0.97	7.1
2.68	483.03	0.99	7.2
2.65	1011.58	0.99	7.3
3.31	468.53	0.99	7.4
6.18	1113.91	0.96	7.5
3.69	564.75	0.99	7.6
5.53	1025.05	0.98	7.1
3.90	823.49	0.99	7.3
5.39	865.04	0.99	7.4
4.49	622.54	0.99	7.5
5.91	895.74	0.99	7.6
3.63	411.28	0.99	7.2

Posterior a ajustar y determinar los parámetros de cada ajuste, se obtuvo la ecuación empírica que caracteriza el fenómeno de decremento de CO_2 en el aire. Tomando los promedios de los coeficientes α y β de todos los ajustes, obteniendo:

$$CO_{2,empirico} = 400 + 775.52 e^{-0.0044 t} \quad (3.2)$$

Se calculó la desviación estándar de ambos parámetros: $\alpha \pm 0.0013$ $\beta \pm 251.89$

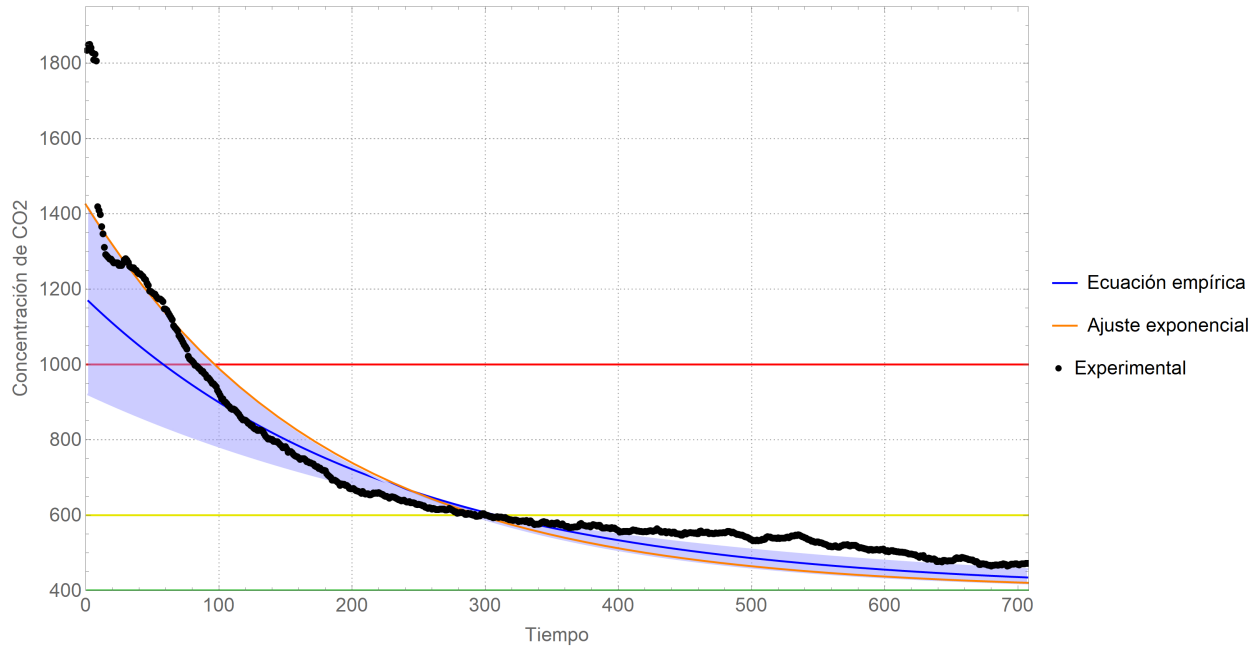


Figura 3.1: Ejemplo de ajuste donde se observa una buena concordancia, dentro del intervalo de confianza, entre la ecuación empírica y los datos. Aula 215 19/01/23

En la gráfica 3.1 se observan, en el eje de ordenadas la concentración de CO_2 en ppm , en el eje de abscisas el tiempo en s , como puntos negros los datos registrados por el sensor. La línea naranja corresponde al ajuste exponencial a los datos, la línea azul corresponde a la ecuación empírica con bandas en azul más tenue correspondiente a la desviación estándar empírica

De la ecuación 3.2 podemos obtener el tiempo aproximado para que los espacios descendan a niveles de 600 & 500 ppm de CO_2 correspondiente a un aire saludable para respirar tras haber acumulado concentraciones altas durante las 5 h de clases.

Despejando t obtenemos

$$t = \ln \left| \frac{\beta}{CO_2 - 400} \right| \left(\frac{1}{\alpha} \right) \quad (3.3)$$

Obtenemos el intervalo de tiempo considerando la desviación estándar de la ecuación empírica

$$t_{(500 \text{ ppm})} \approx 6 : 52 \text{ h} \sim 8 : 46 \text{ h}$$

$$t_{(600 \text{ ppm})} \approx 4 : 50 \text{ h} \sim 5 : 08 \text{ h}$$

Es evidente que el tiempo de renovación de aire para alcanzar niveles recomendados en cuando a la concentración de CO_2 como lo establecen los estándares mencionados con anterioridad, es demasiado extenso. De forma explícita, la ecuación 3.2 nos indica que tras alcanzar una

concentración superior a 1175.5 *ppm*, en cualquiera de los espacios, éste se tendría que desalojar por lo menos cuatro horas y cincuenta minutos antes de poder realizar cualquier actividad en condiciones del ambiente interior saludables nuevamente.

3.1.2. Humedad Relativa

De manera similar se realizó un análisis del porcentaje de humedad relativa. Los registros **en todo los espacios** al interior del edificio en lo que la calefacción estaba encendida, reportaron niveles por debajo de 30 % durante toda la temporada. Pueden observarse registros máximos de hasta 44 % sin embargo, esto es por una alta concentración de personas en dicho espacio además de ser, la frecuencia de estos registros, prácticamente nula, <1 % de los datos

Tabla 3.3: Humedad Relativa registrada en temporada de invierno

Espacio	RH [%]		
	mín	media $\pm \sigma$	máx
Aula 015	7.3	15.4 \pm 3.9	36.7
Aula 208	8.8	18.5 \pm 4.3	37.1
Aula 215	7.0	15.9 \pm 4.2	33.2
Biblioteca	8.7	16.1 \pm 3.3	25.3
Cafetería	10.5	17.9 \pm 4.2	43.7
Oficinas/ Cubículos	7.2	16.5 \pm 4.1	34.9
Dirección	8.1	16.7 \pm 4.7	30.7
Recepción	5.8	15.4 \pm 3.9	29.7
Auditorio Sor Juan	7.1	15.6 \pm 4.0	31.4

La tabla anterior 3.3 concentra la estadística de los registros de *RH* en los espacios donde la calefacción estuvo encendida, el espacio con porcentaje de humedad superior se registra en el Aula 208 donde los niveles de este parámetro se encontraban entre 14.2 y 22.8 por ciento la mayoría del tiempo. Los espacios con menor porcentaje de humedad son el Aula 215 y Recepción, ambos espacios con ventanas, los registros rondaron entre 11.5 y 19.3 durante el tiempo de analizado. Existen estudios [16, 4] que han determinado que los niveles favorables de humedad relativa en el aire entran en el intervalo entre 30 % a 60 %; escenario que, de forma muy escasa, prácticamente nula, se registra al interior del edificio. Esto se aborda con mayor detalle en el capítulo próximo.

3.2. Energía

Recordemos de las tablas 2.3 2.4 el consumo energético del edificio se separa en eléctrico y térmico. Se calcularon, *grosso modo*, las pérdidas energéticas de las calderas, las emisiones de dióxido de carbono equivalente anuales por la quema de gas en estas, se analizaron las prácticas con los termostatos acorde al comportamiento de la temperatura al interior. Se estimó aproximadamente el número de módulos fotovoltaico que se requerirían para lograr cubrir la demanda eléctrica del edificio, por último, también se estimaron las emisiones acorde al consumo de energía eléctrica por el factor de emisión en la provincia de Quebec

3.2.1. Consumo Térmico

En el edificio el único sistema que emplea gas natural son las calderas que lo climatizan, por ello es posible calcular la energía térmica para calentamiento anualmente. Considerando el poder calorífico del gas igual $38.44 \text{ MJ}/\text{m}^3$ acorde con la información proporcionada por el proveedor, la energía total se obtiene como

$$E_T = 38.44 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 13,036 \text{ m}^3 = 501,103.84 \text{ MJ} \quad (3.4)$$

considerando una eficiencia térmica de $\eta_{caldera} = 80\%$ de las calderas, despreciando pérdidas en otras partes del sistema, se calcula que las pérdidas de energía aproximada en el escenario más favorable son

$$\text{Pérdidas} = (1 - \eta_{caldera})E_T \approx 100,220.8 \text{ MJ} \quad (3.5)$$

Lo que equivaldría a $2,607.2 \text{ m}^3$ de gas natural solo en pérdidas.

Por otro lado, se obtiene la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por este consumo, mediante el factor de de emisión por combustión de CO_{2eq} calculado por la *Environmental Protection Agency* [1] es de 0.05023 kg por MJ donde remarcan que este factor corresponde al gas natural combustionado a diferencia de las emisiones directas de gas natural liberadas a la atmósfera sin quemarse la que son aproximadamente 25 veces más potentes en efecto de calentamiento de la atmósfera. Con lo anterior las emisiones de gases de efecto invernadero solo por el uso de las calderas es de

$$\begin{aligned} GEI_{caldera} &= 501,103.84 \text{ MJ} \times 0.05023 \text{ CO}_{2eq}/\text{MJ} \\ &= 25,170.45 \text{ kg} \\ &\approx 25.2 \text{ Ton CO}_{2eq}/\text{Año} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Tabla 3.4: Temperatura registrada en temporada de invierno

Espacio	T [°C]		
	mín	media $\pm \sigma$	máx
Aula 015	21.9	25.2 \pm 1.2	28.8
Aula 208	21.0	23.3 \pm 0.7	27.9
Aula 215	22.6	26.4 \pm 1.1	28.7
Biblioteca	23.4	25.4 \pm 0.4	26.4
Cafetería	19.8	24.3 \pm 1.9	32.64
Oficinas/ Cubículos	22.3	25.3 \pm 1.0	28.7
Dirección	21.2	24.0 \pm 0.9	29.4
Recepción	19.0	24.8 \pm 0.9	28.2
Auditorio Sor Juan	23.5	25.5 \pm 0.7	28.2

Podemos observar, de la tabla anterior 3.4 que contiene, que la temperatura al interior de la Sede ronda entre los 22.6 y los 27.5 °C. Acorde con el estándar 55 de la ASHRAE [4], la temperatura de confort en el interior de una edificación, para la zona de clima a la que pertenece Gatineau, durante la temporada de invierno establece un intervalo de temperatura recomendado 20°C a 23,5°C (68°F a 74°F) para el horarios de ocupación, y 15,5°C a 18,5°C (60°F a 65°F) para el horario de no ocupación. Lo que significa la calefacción está 4 grados por encima de la temperatura de confort. Se comentó en la sección que la configuración actual de los termostatos, aquí se encuentra a causa y solución. El modificar esta práctica de uso de energía a una de uso eficiente, implicaría, cualitativamente, una sensación mayormente cómoda para los y las usuarias que hacen uso en las instalaciones. Reduciría emisiones de *GEI* al ahorrar la combustión excedente de gas natural asociada a esos 4 grados por encima de de la temperatura de confort. Las repercusión inclusive serían en ahorro económico en cuanto a las facturas de este combustible. Claro que se requiere un estudio más detallado a fin de cuantificar el alcance de las consecuencias que se tendría al adoptar la práctica de uso eficiente de la energía antes mencionada.

3.2.2. Consumo Eléctrico

El consumo eléctrico anual promedio de la Sede es de 129,708 kWh, a partir de ello se obtuvo el aporte de emisiones de *GEI* correspondientes a este consumo. La red eléctrica de Quebec en la generación de energía eléctrica reporta un factor de emisión para la provincia

de 1.5 gramos de CO_{2eq} por kiloWatt-hora ($g CO_{2eq}/kWh$) en 2020 [6]. Por lo tanto

$$\begin{aligned} GEI_{electrico} &= 129,708 kWh \times 1.5 g CO_{2eq}/kWh \\ &= 194,562 g CO_{2eq} \\ &\approx 0.2 Ton CO_{2eq} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Si se buscara satisfacer la demanda eléctrica (o parte de ella) por generación fotovoltaica, lo primero a estimar, grosso modo, el dimensionamiento fotovoltaico, es consumo de energía promedio diario (E_g) se calcula de la siguiente manera

$$E_g = \frac{129,708 kWh}{365} = 355.4 kWh/día \quad (3.8)$$

Posteriormente se requería la obtener la la potencia pico como

$$P_p = \frac{E_g}{R_s R_t \eta_{et}} \quad (3.9)$$

Donde P_p es la potencia pico que debe tener el sistema para satisfacer la demanda de energía promedio diario (E_g) de 355.4 kWh por día, dado el recurso solar (R_s) de la ubicación geográfica en la Tabla 1.6 3.9 HSP en promedio diario, el rendimiento térmico (R_t) de las placas solares típicamente entre 70 %-82 % y la eficiencia eléctrica de conversión del sistema (η_{et}) asumida al 92 %.

Sustituyendo en 3.9

$$P_p = \frac{355.4 kWh}{3.9 HSP(0.82)(0.92)} = 120.8 kW \quad (3.10)$$

Es decir, se requieren instalar 120.8 kW de potencia fotovoltaica para satisfacer la potencia pico estimada el caso del rendimiento térmico supuesto (82 %). De instalarse paneles *CanadianSolar CS3Y-495*, disponibles en la región donde se encuentra la Sede, se requerirían 244 paneles. Con un área efectiva de 600 m^2 no sería posible instalar tal cantidad de paneles debido a los efectos de sombreado. En la figura 3.2 se observa la producción hipotética de energía de la instalación fotovoltaica propuesta contra el consumo diario de la Sede mes por mes

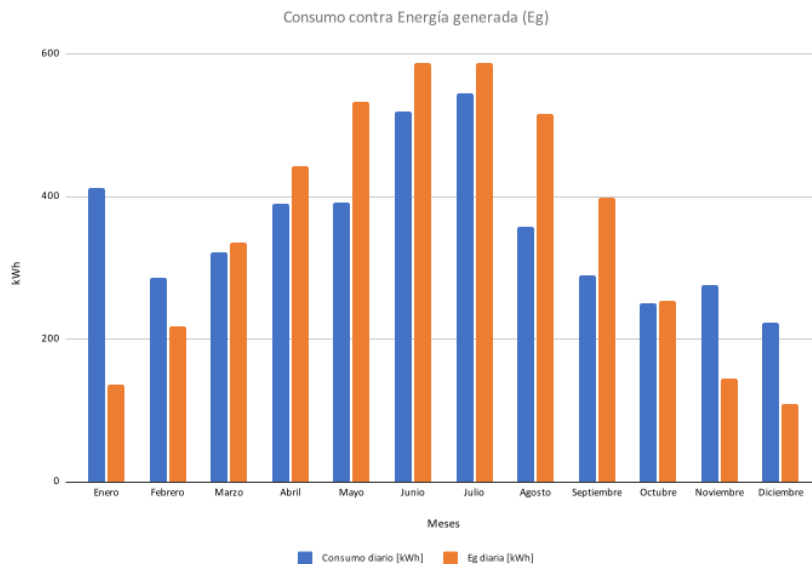


Figura 3.2: *Caso hipotético de energía generada vs consumida diariamente*

El cálculo anterior se hace para ejemplificar la cobertura del consumo eléctrico anual del edificio, es recomendable realizar un cálculo para obtener una precisión mayor en cuanto al dimensionamiento fotovoltaico que requiere la escuela.

Tabla 3.5: Posible porcentaje de consumo eléctrico cubierto por la instalación fotovoltaica estimada

mes/[°C]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
%	33	76	104	114	136	113	108	144	138	101	53	49

El adaptar esta estrategia requiere tomar en consideración el recurso del que se dispone a lo largo del año evaluando las ventajas de priorizar los meses en los que existe un excedente en la generación como se puede observar en la tabla 3.5 así considerar realizar un análisis en el que se busque tener aportación de energía renovable solo en los meses de mayo a octubre.

3.3. Salida Emergencia Norte

La Salida de Emergencia Norte se puede considerarse como un apéndice del edificio, es un espacio donde la calefacción no está encendida lo que nos permite obtener resultados de la transferencia de calor con el exterior únicamente con las propiedades térmicas de la envolvente del edificio. De manera similar, al haber en este espacio puertas existen filtraciones que no se presentan en otros espacios.

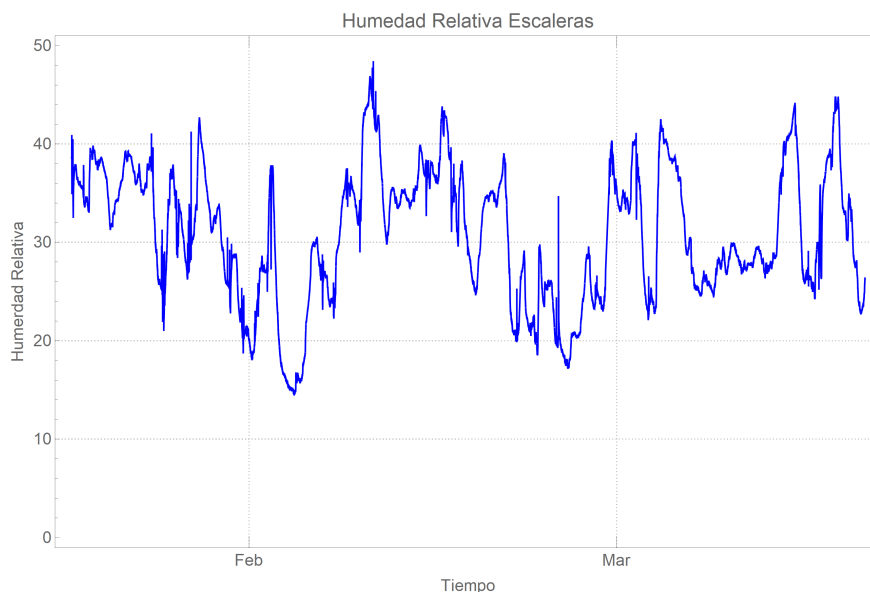


Figura 3.3: *Salida Emergencia Norte Planta Baja*

Como puede observarse en la gráfica anterior 3.3, los niveles de humedad relativa registrados en este espacio son superiores a los registrados en cualquiera de los espacios donde la calefacción estaba encendida. Los niveles en este espacio oscilaron entre los 24.1 y 37.7 por ciento de humedad durante la temporada de registro.

Tabla 3.6: Resultados de monitoreo Salida Emergencia Norte

	min	media $\pm \sigma$	max
RH [%]	14.5	30.9 ± 6.8	48.4
T [°C]	5.0	11.61 ± 2.1	18.6
CO₂ [ppm]	305	-	1078

La temperatura en este espacio se conservó entre 9.5 y los 14 grados Celcius esto únicamente por el aislamiento de la envolvente. La temperatura en en el exterior llego a bajar hasta los -33 °C, aun así, este espacio permaneció a 5 °C el 4 de febrero de 2023 como es posible observar en 3.4

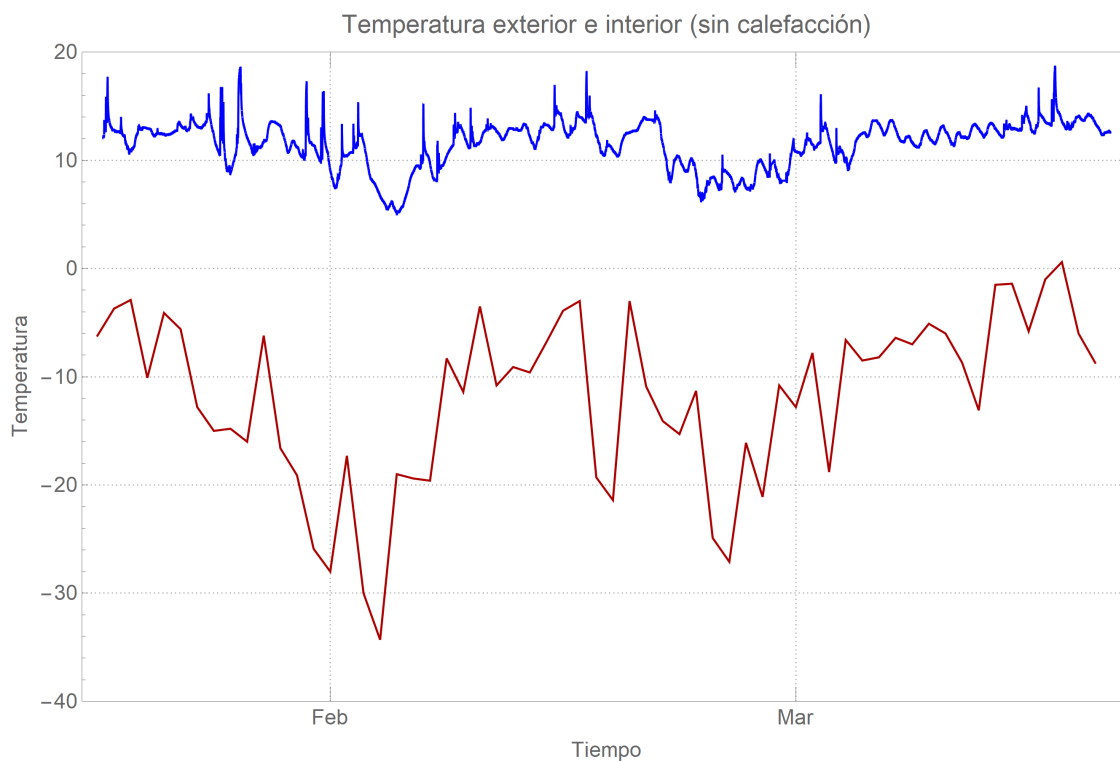


Figura 3.4: *Comportamiento térmico de la envolvente con el exterior en invierno*

En la gráfica siguiente 3.5 es evidente la influencia de una alta concentración de usuarios en el edificio en la calidad del aire en un espacio cuya ocupación es nula todo el tiempo ya que nadie tiene acceso este lugar (excepto durante un siniestro), implicado así efectos en la totalidad del edificio; la primera parte, durante enero, se observa un elevación, de los niveles de CO_2 medidos en comparación con los meses siguientes en los que la ocupación pasó de máxima (curso Puma) a Normal.

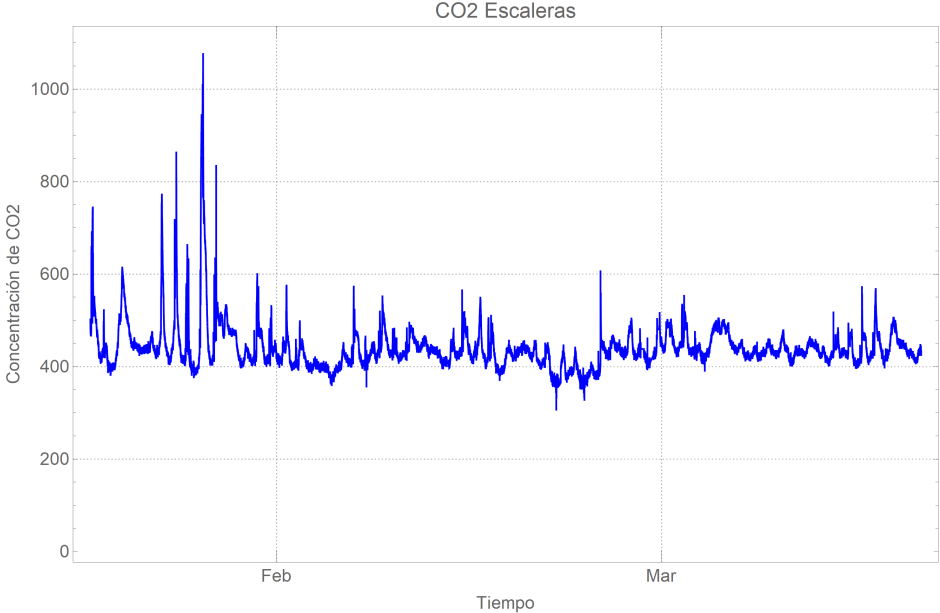


Figura 3.5: *Concentración de CO₂ en Salida Emergencia Norte*

Capítulo 4

Discusión

En las siguientes líneas se comentará acerca de los resultados expuestos en la sección anterior. Conservando el orden que se estableció previamente se discute a continuación los aspectos relacionados a la calidad de aire al interior de la sede.

La ecuación empírica o relación empírica 3.2 que se obtuvo, caracteriza el fenómeno de vaciado de la concentración de CO_2 , esta es la mejor aproximación que se obtuvo respecto a los cambios en la calidad de aire, una ecuación sencilla, simple y elegante que proporciona valiosa la información requerida para tomar decisiones. La amplitud de esta ecuación, otorgada por el parámetro β nos indica que la concentración de dióxido de carbono presente en las aulas tras un día de clases va de las 923.6 – 1427.4 ppm en todos los espacios esto en el tiempo $t = 0$ en 3.2, momento en que las clases han terminado, gran parte de los usuarios se retiran del edificio, o sea 14 : 00 h . Tras manipularse un poco, es capaz de proporcionar el tiempo necesario que debe desalojarse los espacios para renovar el aire al interior de las aulas a niveles saludables: 5 hora para reducir a 600 ppm y de 7 a 9 horas para bajar a 500 ppm .

De acuerdo con las recomendaciones de la ASHRAE *Standard 55-2010*[4] acerca de la humedad relativa adecuada en espacios de trabajo al interior de una edificación (entre 30-60 %) Razjouyan, Javad et al. realizaron un estudio [16] a diversos grupos de 134 personas para evaluar la respuesta al estrés, y la calidad del sueño. Como ellos exponen “*la falta de estudios de suficiente tamaño y diversidad que relacionen la humedad relativa (RH) con los resultados de salud ha sido un factor impulsor de la relajación de las normas de confort térmico para la RH y la eliminación de un límite inferior para el aire seco.*” Por ello se reafirma la importancia que tuvo realizar mediciones a los niveles de RH en el edificio UNAM-Canadá. Dicho estudio afirma también que “*Los que pasan la mayor parte del tiempo en la oficina en condiciones de 30 %-60 % de RH experimentan un 25 % menos de estrés en la oficina que los*

que pasaron la mayor parte del tiempo en condiciones más secas. Además, un estudio correlacional de respuesta al estrés sugiere que los valores óptimos de RH pueden encontrarse en un intervalo aún más estrecho, en torno al 45 %.” En contraste con estas recomendaciones los niveles de humedad relativa registrados en la Sede son alarmantemente inferiores ya que el porcentaje máximo normal alcanzado fue de 22.8 %, $\sim 7\%$ por debajo de la cota mínima recomendada, alcanzado, apenas, la mitad de los valores óptimos hallados en el estudio mencionado con anterioridad. Como usuario del edificio -como estudiante del curso puma y en ocupación normal- de la Sede, experimenté afectaciones en ojos y sistema respiratorio al igual que disconfort térmico constantemente al desarrollar actividades al interior de la sede, mismo que colegas y compañero usuarios también del edificio. Esto se observa de manera cuantitativa en la medición de las prácticas de configuración de los termostatos que rebasan hasta 4 grados la zona de confort, implicando un derroche energético de al menos 20 %, en el escenario más favorable de los sistemas de calefacción, adicionando costos por suministro no necesario, así como emisiones de gases de efecto invernadero.

Es necesario realizar un estudio más detallado acerca de un dimensionamiento fotovoltaico. Así como evaluar la viabilidad económica y ambiental de esta estrategia, ya que la generación de emisiones GEI en la provincia de Quebec es realmente baja comparada con la emisión promedio del país de $110 \text{ g } CO_{2eq}/kWh$. Así como evaluar las prácticas de consumo en la estación de verano, temporada en la que se presenta el mayor consumo eléctrico.

El monitoreo en la Salida de Emergencia Norte proporciona el comportamiento térmico de la envolvente del edificio. Los muros de la envolvente del edificio se componen de las siguientes capas

- 1/2” de YESO
- ESCUDO DE VAPOR
- AISLAMIENTO DE FIBRA DE VIDRIO RSI 3.5
- 1/2” YESO tipo X (resistente al fuego)
- BARRERA DE AIRE (TYVEK) JUNTAS SELLADAS
- 1” ESPACIO DE AIRE
- REVESTIMIENTO DE LADRILLO

Tras analizar la gráfica 3.4 es evidente el correcto aislamiento térmico del edificio; ya que en las condiciones extremas de menor temperatura exterior (-33 °C) este espacio permaneció por encima de los 0 °C así como el resto de la temporada.

A partir de la discusión anterior, se vislumbra la ruta que los proyectos PITAAE venideros deben seguir. Se han establecido las bases de futuras investigaciones a las que se propone, en cada una se tenga un enfoque integral, considerando aspectos, técnicos y sociales, buscando la reducción de emisiones de GEI. Al implementar desde técnicas pasivas que renueven el aire hasta el mejoramiento o sustitución de los sistemas actuales. Gestionando el uso del agua de una manera adecuada, adaptando desde tecnologías como captadores de agua pluvial (en los primeros capítulos se expone la magnitud de este recurso) hasta el uso eficiente de agua, energía o cualquier suministro dentro de la Sede.

Capítulo 5

Conclusiones

La conformación de un edificio sustentable es una virtuosa labor, implicando no solo la modificación técnica del espacio, en la búsqueda de la calidad del ambiente para las personas que desarrollen actividades académicas, laborales o recreativas al interior de ésta, trasciende a la modificación de hábitos y pensamiento tras visualizarse, que contar con un lugar digno, confortable y saludable, promueve el rendimiento, productividad e inclusive la felicidad de las y los usuarios. Este trabajo de investigación sustenta que condiciones actuales del edificio la escuela de extensión Sede UNAM-Canadá son las siguientes

1. En las condiciones actuales, la tasa de renovación de aire al interior del edificio requiere al menos 5 horas para restablecer niveles saludables en la calidad del aire luego de un día de clases de un Curso Puma (escenario de ocupación máxima).
2. Dada la selección actual de la temperatura del edificio, se tienen pérdidas de al menos 20 % en los sistemas de calefacción del edificio, tanto por antigüedad de los sistemas como por la configuración actual del termostato.
3. Las condiciones actuales del edificio se alejan del confort térmico de humedad y concentración de CO_2 en el aire interior, para desempeñar actividades de cualquier tipo, llegando a impactar de manera negativa en las salud de los usuarios de la Sede.
4. Existe un incumplimiento al *código canadiense de energía para edificios y estándar CSA C656-14* por parte de los sistemas de climatización.
5. El aislamiento térmico de la envolvente de la sede presenta un comportamiento adecuado en condiciones de muy bajas temperaturas

Capítulo 6

Trabajos Futuros

El alcance descriptivo de este trabajo de investigación, logra divisar posibles estrategias preliminares para mejorar la calidad del aire al interior del edificio y el manejo eficiente de la energía eléctrica o térmica haciendo las siguientes recomendaciones, para proyectos futuros, como ingeniero en energías renovables y pionero de los proyectos PITAAE; tras realizar esta primera auditoría toma gran importancia el estudio de técnicas de ventilación pasivas, como la modificación de ventanas no fijas, validando resultados a través del materia que este trabajo aporta (diagrama simplificado de la edificación mediante el software *SketchUp* así como la caracterización termofísica de los materiales para simulaciones energéticas). Realizar estudios cuantitativos/cualitativos de carácter social en cuanto a la salud y confort de los usuarios de la Sede. Estudios de factibilidad técnica, económica y ambiental para la climatización de la escuela empleando energías renovables (instalaciones solares fotovoltaicas/térmicas, Bombas de calor geotérmicas (GHP), etc.). Aún hay trecho por recorrer para hacer de la sede una edificación sustentable, el alcanzar este objetivo es compatible con hacer de la escuela de extensión de la UNAM en Canadá un lugar seguro, que fomente la equidad de género, el respeto a las creencias, religión u orientación que cada persona que haga uso de este edificio, independientemente de su cultura o país de origen, perciba no solo confort térmico o una certificación de sustentabilidad PLATINUM, además de ello, encuentre un espacio en el que pueda desarrollar y enriquecer su persona para alcanzar la meta más alta de todas, simplemente **SER**.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Gráficas Concentraciones CO_2 en ocupación máxima

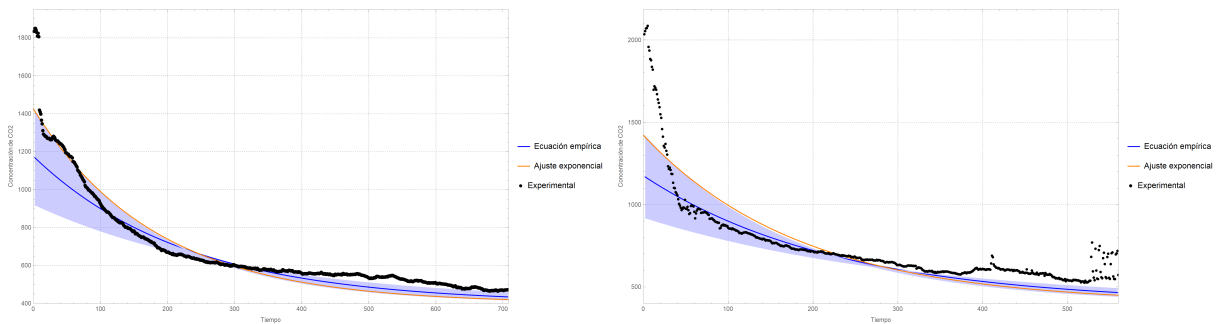


Figura 7.1: a) Aula 015 19/01/23, b) Aula 208 19/01/23

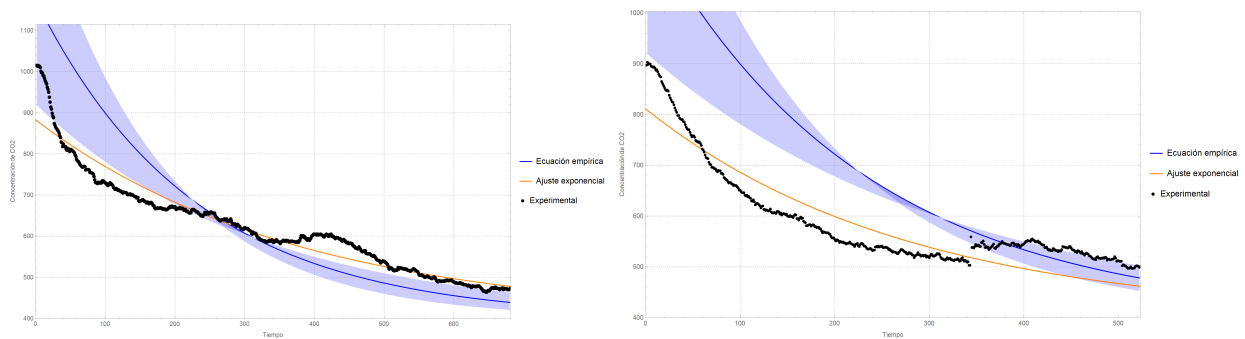


Figura 7.2: a) Aula 215 19/01/23, b) Aula 015 27/01/23

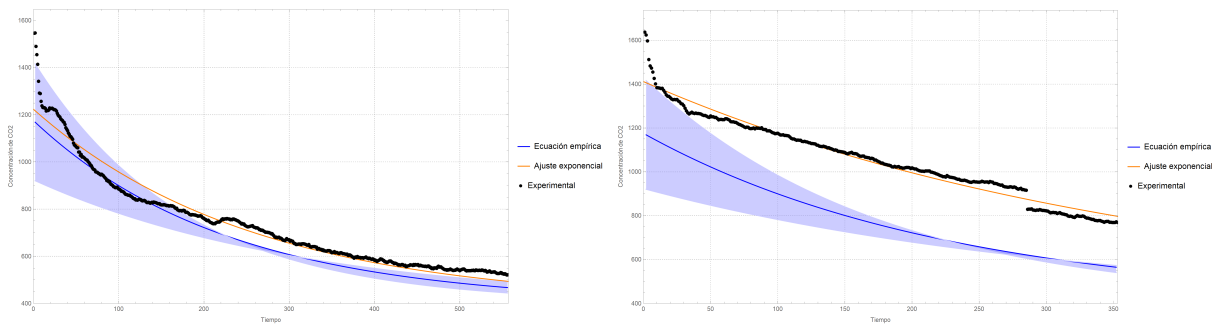


Figura 7.3: a) Aula 015 20/01/23, b) Aula 215 20/01/23

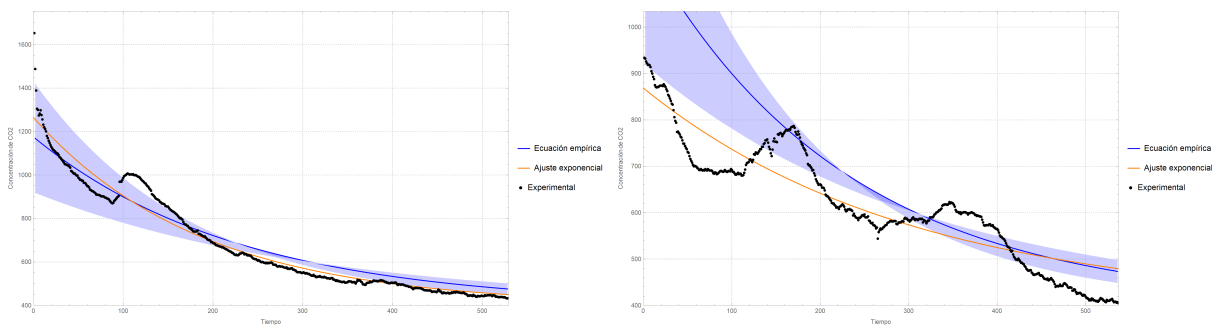


Figura 7.4: a) Aula 015 23/01/23, b) Aula 215 23/01/23

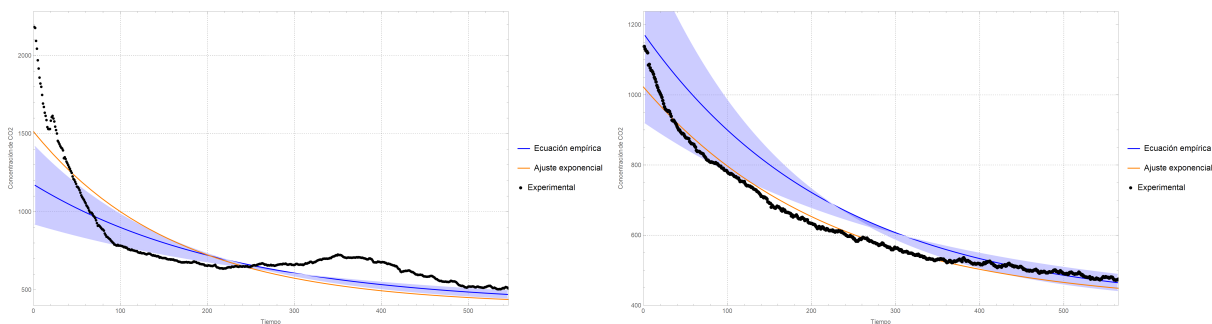


Figura 7.5: a) Aula 215 24/01/23, b) Aula 015 25/01/23

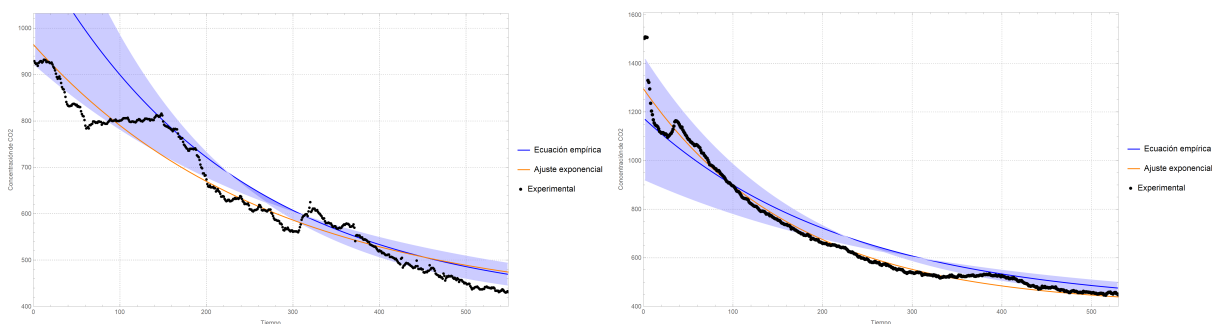


Figura 7.6: a) Aula 215 25/01/23, b) Aula 015 26/01/23

7.2. Planos del Edificio

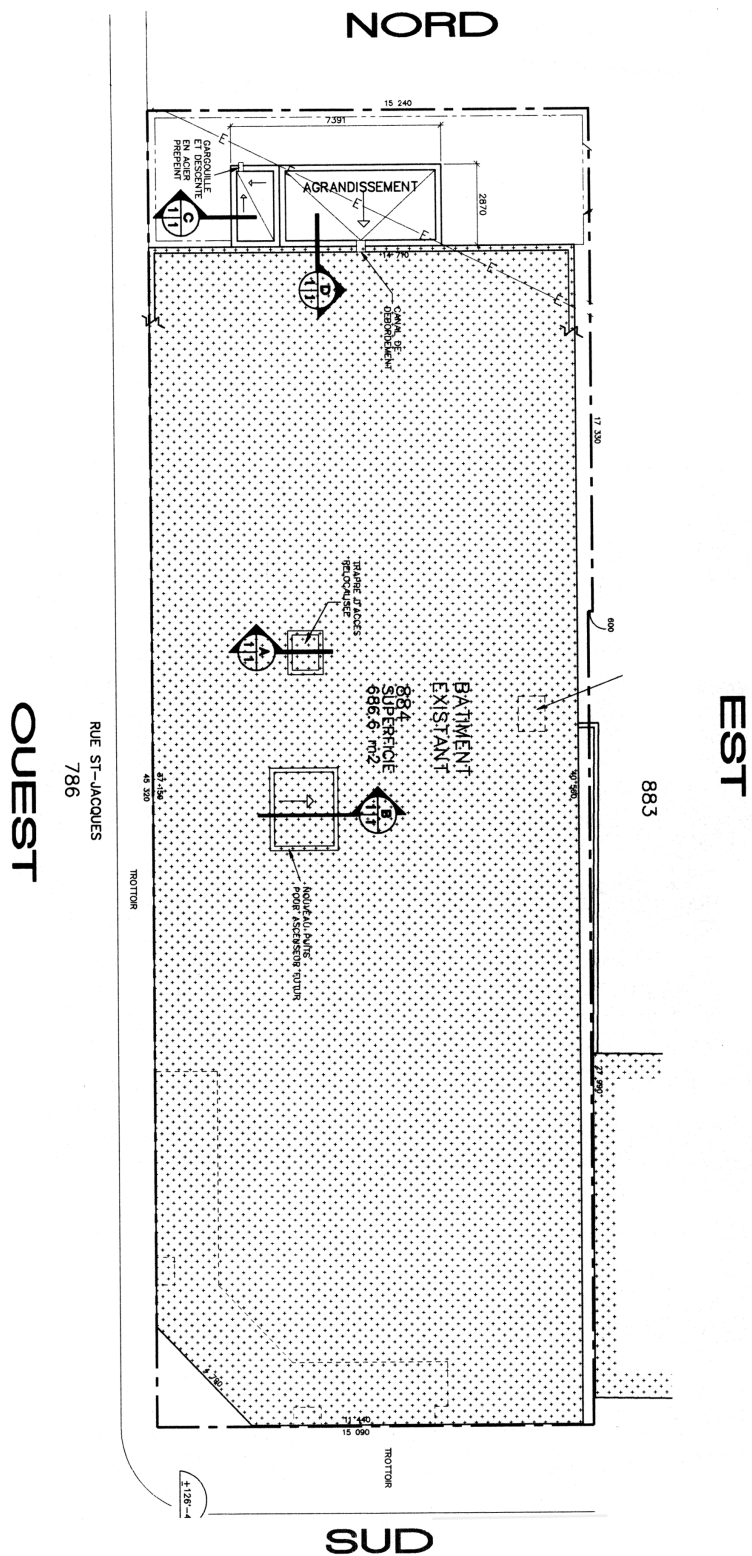


Figura 7.7: Plano cenital del edificio

7.3. Construcciones de muros del edificio para simulaciones energéticas

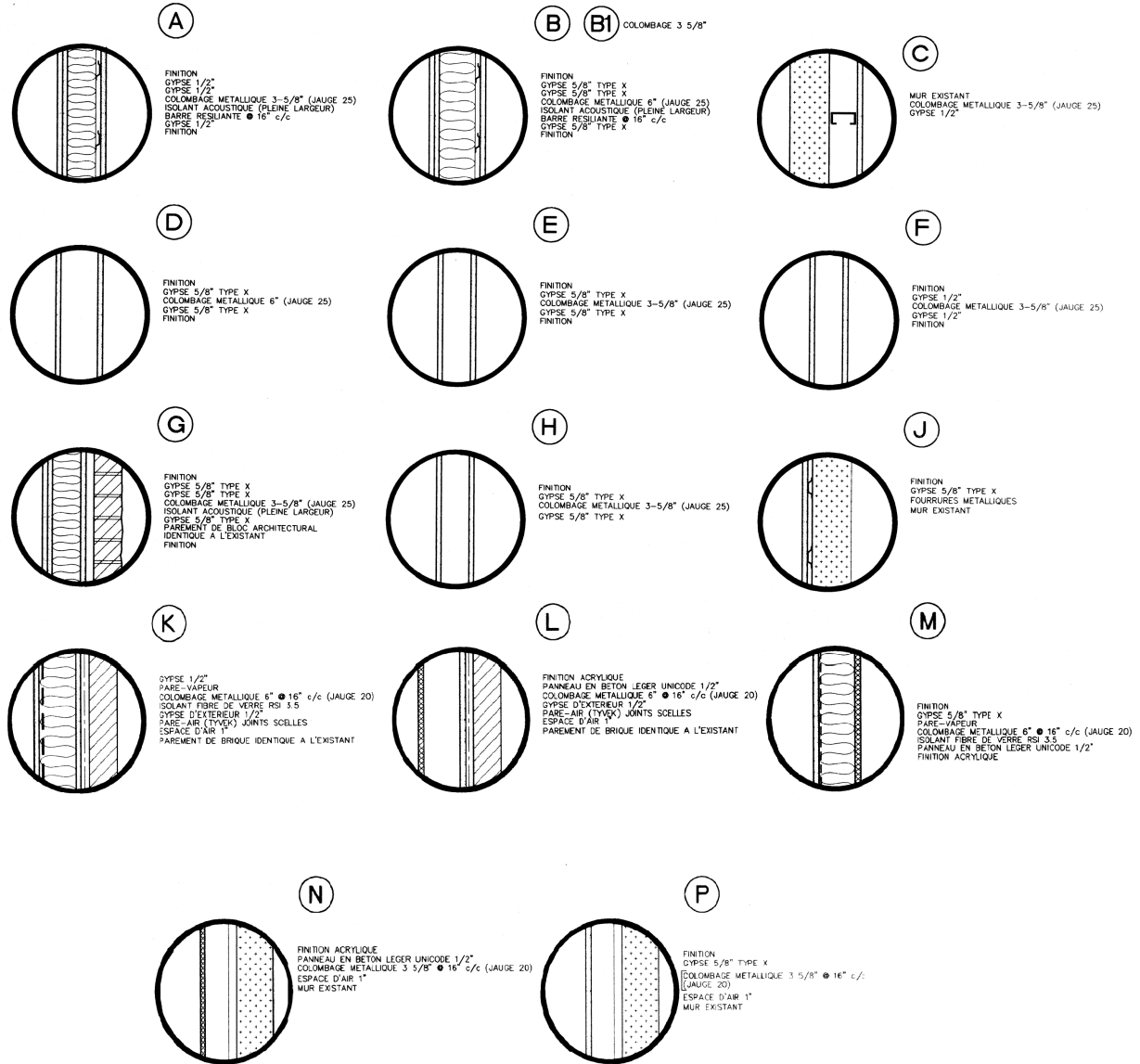


Figura 7.8: Capas de los diferentes muros presentes en el edificio

Bibliografía

- [1] Agency, E. P. (2022). Greenhouse gases equivalencies calculator - calculations and references. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{\char\font}{\char\font}{\char\font}calculations-and-references>.
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE (2013a). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE, Atlanta, GA.
- [3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE (2013b). *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. ASHRAE, Atlanta, GA, USA.
- [4] ASHRAE (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE, Atlanta, GA.
- [5] ASTM International (2021). Astm c518 / c518m - 21 standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. <https://www.astm.org/Standards/C518.htm>.
- [6] Canadian Government (2020). Provincial and Territorial Energy Profiles - Quebec. <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/provincial-territorial-energy-profiles/provincial-territorial-energy-profiles-quebec.html?undefined&wbdisable=true#s3>.
- [7] Canadian Standards Association (CSA) (2019). *CSA A440.4:19 - Window, door, and skylight installation*. CSA Group.

- [8] Cedar Lake Ventures, Inc. (2023). Average weather in gatineau, canada, year round. <https://weatherspark.com/y/23207/Average-Weather-in-Gatineau-Canada-Year-Round>.
- [9] Consejo Nacional de Investigación de Canadá (2017). National energy code of canada for buildings 2017. https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/cnrc-nrc/NR24-24-2017-eng.pdf.
- [10] Council, U. G. B. (2021). LEED v4.1 OPERATIONS AND MAINTENANCE. https://storage.pardot.com/413862/1675798233hzPQRwSz/LEED_v4.1_O_M_Guide_020623_1_.pdf.
- [11] del Río Portilla, J. A. (2022, ISBN 978-607-30-7275-5). *Introducción a las relaciones empíricas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [12] Gobierno de Canadá (2016). Energy efficiency regulations, 2016. <https://laws-lois.justice.gc.ca/pdf/SOR-2016-311.pdf>.
- [13] Hoicka, C. E. and Das, R. (2021). Ambitious deep energy retrofits of buildings to accelerate the 1.5° c energy transition in canada. *The Canadian Geographer Le Géographe canadien*, 65(1):116–127.
- [14] Laars (2006). *Laars Mighty Therm 175 to 400 HH-PH Hydronic Boiler Installation Manual*. Disponible en Boston Heating Supply.
- [15] National Research Council Canada (2015). National building code of canada. https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/publications/codes_centre/2015_national_building_code.html.
- [16] Razjouyan, J., Lee, H., Gilligan, B., Lindberg, C., Nguyen, H., Canada, K., Burton, A., Sharafkhaneh, A., Srinivasan, K., Currim, F., et al. (2020). Wellbuilt for wellbeing: Controlling relative humidity in the workplace matters for our health. *Indoor air*, 30(1):167–179.
- [17] Shi, Z., Abdelalim, A., O'Brien, W., Attar, R., Akiki, P., Graham, K., Van Waarden, B., Fai, S., Tessier, A., and Khan, A. (2015). Digital campus innovation project: Integration of building information modelling with building performance simulation and building diagnostics. In *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design*, pages 51–58.

- [18] Thomas, G. (2002). Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. *Fire and materials*, 26(1):37–45.
- [19] US Department of Energy (2019). Energyplus. <https://energyplus.net/>.
- [20] U.S. Green Building Council (2021). LEED v4 for Existing Buildings: Minimum Program Requirements. <https://www.usgbc.org/credits?Version=%22v4%22&Rating+System=%22Existing+Buildings%22&MinimumProgramRequirements=%5B%22Minimum+program+requirements%22%5D>.
- [21] USG Corporation (2014). Thermal properties of gypsum. https://www.usg.com/content/dam/USG_Marketing_Communications/united_states/product_promotional_materials/finished_assets/third-party_research_reports/Thermal-Properties-of-Gypsum-USG-Third-Party-Report-21-014.pdf.
- [22] Velázquez-Zúñiga, C. L., Cortés, H., and del Río, J. A. (2023). *Manual de construcción: Monitor CO₂*. en prensa UNAM.
- [23] York International Corporation (2019). *TECHNICAL GUIDE SPLIT SYSTEM AIR CONDITIONERS MODELS: YCD*. Johnson Controls.
- [24] Zhivov, A. and Lohse, R. (2020). *Deep Energy Retrofit: A Guide to Achieving Significant Energy Use Reduction with Major Renovation Projects*. Springer.