

Dimensionamiento óptimo de acumuladores térmicos mediante simulación de la demanda térmica durante invierno a través del entorno digital de OpenStudio para cada unidad de un bloque de apartamentos virtual contextualizado en Quebec.

Juan Pablo Díaz Ramírez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil.

Director

Nilson Fernando Henao.

Doctor en filosofía (Ph.D) en ingeniería electrónica.

Codirector

Edwin León Moros.

Ingeniero Civil.

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2024

Agradecimientos

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que hicieron parte de este proceso. En primer lugar, a mis padres, El ingeniero Juan Oscar Díaz Cardona y la Abogada Dina Ilse Ramírez Gutiérrez por darme todo el amor y el cariño que se le puede dar a un hijo, por enseñarme a creer en mí y sobre todo por ser mis mayores defensores ante la adversidad. Le agradezco a mi hermano el ingeniero Oscar Iván Díaz Ramírez con quien tengo una relación especial, así mismo quiero mencionar a su esposa la doctora Carolina Ardila Suarez e hijos, por apostar por mí y abrirme las puertas de maravilloso hogar en donde, gracias a ellos, crecí como persona y viví momentos invaluable.

Similarmente, quiero agradecer al programa MITACS Globalink, que permitio el desarrollo de la investigación. Especialmente quiero agradecer al equipo de investigacion Laboratoire d'innovation et de recherche en énergie intelligente (LIREI) encabezado por el profesor Kodjo Agbossou en donde me hicieron sentir como si estuviera en casa, brindándome amistad, un excelente ambiente laboral, un inmenso aprendizaje e infinitas experiencias que guardo con mucho anhelo. Es de enfatiza el inmenso agradecimiento que tengo por el doctor Nilson Henao, perteneciente a este grupo, quien es mi director y tengo la suerte de decir que es mi amigo, debo agradecerle por haber dado un voto de confianza por mí tanto como persona como estudiante. Así mismo, quiero reconocer la labor de la Universidad Santo tomas, quien ha puesto en mi servicio excelentes profesionales como el Ingeniero Edwin León moros quien me ayudo desde el primer momento con la mejor de las voluntades y me brindo el apoyo necesario para esta misión académica.

Por ultimo y no menos importante quiero agradecer a la persona que no me dejo desfallecer a través de su apoyo incondicional y me permitió volver a sonreír, Camila Andrea Mora Zarate. La vida nos da lecciones a diario y yo aprendo todos los días, agradezco a esta por permitirme vivir este precioso viaje.

Contenido

1. Dimensionamiento óptimo de acumuladores térmicos mediante simulación de la demanda térmica durante invierno a través del entorno digital de OpenStudio para cada unidad de un bloque de apartamentos virtual contextualizado en Quebec.....	12
1.1 Planteamiento del Problema.....	12
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Estado del arte.	17
2. Marco Teórico	22
2.1 Generalidades	22
2.1.1 Localización: Trois-Rivieres	22
2.1.1.1 Características climáticas	22
2.1.1.2 Desarrollo sostenible	22
2.1.1.3 Plan de adaptación al cambio climático	23
2.1.2 Hydro-Quebec	23
2.1.2.1 Generación de energía eléctrica.....	23
2.1.2.2 Transmisión y distribución de energía eléctrica	24
2.1.2.3 Tarifas de la electricidad.....	24
2.1.3 Acumuladores térmicos.....	25
2.1.2.1 Electric Thermal Storage (ETS)	26
2.2 Datos sintéticos	27

2.2.1 OpenStudio Analysis Framework	27
2.3 Optimización convexa.....	28
2.3.1 Funciones convexas.....	29
2.3.2 Problema de optimización convexa	30
2.3.3 CVXPY	31
3. Método.....	32
3.1 Generalidades.....	32
3.1.1 Metodología de investigación.	32
3.2 obtención de datos sintéticos.....	34
3.2.1. Procedimiento de modelado virtual en el framework de OpenStudio.	34
3.2.2 Caso de estudio.....	40
3.3 Optimización.	45
3.3.1 Modelo matemático.....	45
3.3.2 Solucionador a través de Phyton.	49
4. Resultados.....	50
4.1 Simulación.....	50
4.1.1 Perfiles de la demanda.....	51
4.2 Optimización	63
4.3 Análisis.....	80
5. Conclusiones.....	84
Referencias	88

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Características generales del prototipo</i>	41
Tabla 2. <i>Características de las zonas térmicas del edificio residencial</i>	43
Tabla 3. <i>Caracterización de las zonas térmicas del edificio residencial</i>	44
Tabla 4. <i>Dimensionamiento final de la capacidad optima de almacenamiento.....</i>	64
Tabla 5. <i>Dimensiones finales de la capacidad optima de almacenamiento</i>	83

Lista de figuras

Figura 1. <i>Optimización convexa – Ejemplo</i>	27
Figura 2. <i>Función convexa – Ejemplo</i>	29
Figura 3. <i>Proceso de obtención de datos</i>	35
Figura 4. <i>Visión panorámica de OpenStudio</i>	38
Figura 5. <i>Características del modelo en OpenStudio</i>	38
Figura 6. <i>Edificio residencial modelado</i>	41
Figura 7. <i>Detalle de zonas térmicas del edificio residencial</i>	42
Figura 8. <i>Representación visual de la programación en Phyton</i>	49
Figura 9. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 1</i>	52
Figura 10. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 2</i>	53
Figura 11. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 3</i>	54
Figura 12. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 4</i>	55
Figura 13. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 5</i>	56
Figura 14. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 6</i>	57
Figura 15. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 7</i>	58
Figura 16. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 8</i>	59
Figura 17. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 9</i>	60
Figura 18. <i>Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 10</i>	61
Figura 19. <i>Comportamiento de la demanda térmica durante el invierno</i>	62
Figura 20. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 1</i>	67
Figura 21. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 2</i>	68
Figura 22. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 3</i>	69

Figura 23. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 4</i>	70
Figura 24. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 5</i>	71
Figura 25. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 6</i>	72
Figura 26. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 7</i>	73
Figura 27. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 8</i>	74
Figura 28. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 9</i>	75
Figura 29. <i>Operación del acumulador térmico para la zona térmica 10</i>	76
Figura 30. <i>Comparación del perfil de consumo energético del acumulador térmicos zona 4 Vs.</i> <i>Tarifa dinámica</i>	78
Figura 31. <i>Operación del acumulador termico para la zona térmica 4</i>	80

Resumen

El aumento de la demanda energética destinada a la calefacción de espacios, especialmente en períodos invernales, presenta varios desafíos en materia de la gestión del recurso eléctrico en las viviendas y el uso racional de este. El rápido aumento de los picos de consumo y su duración intensifica el riesgo de estar expuesto a horas no satisfechas de confort térmico en los hogares. Debido a eso, son imperativas las nuevas estrategias para el allanamiento de los picos con el fin de mitigar el efecto del aumento de carga eléctrica de los sistemas de calefacción tradicionales y los períodos de máxima demanda en la red eléctrica. Para enfrentar este desafío, este trabajo presenta una metodología para determinar el dimensionamiento óptimo y la operación de un sistema de acumulador térmico eléctrico en un edificio de apartamentos residenciales. El estudio considera las implicaciones económicas del uso de acumuladores térmicos bajo tarifas dinámicas por tiempo de uso y su impacto en las unidades residenciales. Dicho análisis, se realizó a través del uso de un conjunto de datos sintéticos generados del consumo energético durante la temporada invernal de un edificio residencial típico en Quebec, Canadá, a partir de un prototipo virtual creado a través de la interfaz gráfica de usuario (GIU) de OpenStudio para evaluar el método propuesto. Los resultados demuestran que el uso de acumuladores térmicos, especialmente bajo tarifas eléctricas dinámicas, mejora la gestión energética, evitando picos de consumo y manteniendo el confort térmico en cada apartamento.

Palabras clave: Almacenamiento Térmico Eléctrico, Consumo energético, Demanda térmica, Tarifa Dinámica, Datos Sintéticos, Edificio Residencial, Optimización, Dimensionamiento y Operación Óptima

Abstract

Increasing energy demand, especially in winter periods, presents several challenges for home energy management and the rational use of energy. The quick development of the peak consumption period intensifies the risk of being exposed to unmet hours in households. New strategies for load shifting are critical to mitigate the effect of the increasing electrical load from traditional heating systems and winter peak periods on the grid and the increasing electrical demand. To address such a challenge, this work presents a methodology for determining the optimal size and operation of electric thermal storage (ETS) in multi-zone residential apartment buildings through an optimization problem formulation. The economic implications of using ETS under the time-of-use (TOU) price signals and its impact on residential units are studied. A synthetic energy consumption dataset of a typical residential building in Quebec, Canada, from a virtual prototype created through OpenStudio Graphical user's interface (GIU) and its network is utilized to evaluate the proposed method. Results demonstrate that the rational use of ETS, especially under dynamic electricity rates, enhances energy management, avoiding consumption peaks and keeping thermal comfort in each apartment.

Keywords: electric thermal Storage (ETS), energy Consumption, thermal demand, dynamic price, Synthetic data, Residential Building, Optimization, Optimal sizing and operation.

Introducción

El aumento de la demanda eléctrica a nivel mundial se debe a un esfuerzo global por descarbonizar y enfrentar los desafíos del cambio climático, especialmente durante los inviernos. Canadá no es una excepción a este problema, proyectándose un aumento del 47% en la demanda eléctrica desde 2021 hasta 2050 [29]. Para abordar este desafío, se han implementado diversas estrategias, incluida la generación distribuida, sistemas de almacenamiento de energía e iniciativas de respuesta a la demanda [27]. En estas soluciones, los acumuladores térmicos en entornos residenciales han surgido como una herramienta clave para gestionar de manera eficiente el consumo eléctrico, los cuales son usados para mitigar los picos de consumo que genera una vivienda a través de su sistema de carga [14]. Este trabajo se centra en la integración de sistemas de almacenamiento térmico eléctrico en escenarios de respuesta a la demanda, contribuyendo así a la gestión eficaz de la demanda y promoviendo prácticas de energía sostenible.

La literatura muestra que los referentes en el tema analizan la importancia de los sistemas de gestión energética y almacenamiento térmico para diversos edificios, destacando sus beneficios tanto para los usuarios como para la red eléctrica (Wong & Pinard, 2017). Dentro de este campo se ha enfatizado en el dimensionamiento de sistemas de acumuladores de calor latente (Daryanian & Bohn, 1993) (Baker et al., 2017), así como en la optimización de la operación de dispositivos eléctricos (Dominguez et al., 2022) (Ji et al., 2021), considerando variables como los precios dinámicos de energía. Además, se han explorado análisis enfocados con el control del despacho energético (Devia et al., 2021) y la integración de fuentes renovables (Domínguez-Jiménez et al., 2023). La mayor aproximación al objetivo de este trabajo es (Syed, 2011), sin embargo, la aproximación al dimensionamiento no se realiza mediante técnicas exactas [14], [22], [25], [20], [11], [24], [21], [26].

A pesar de estos avances, aún existe un vacío en cuanto al dimensionamiento óptimo de los sistemas de almacenamiento térmico eléctrico, para reducir costos y proporcionar confort térmico especialmente en contextos específicos como Quebec.

Con el objetivo de evaluar el impacto de este tipo de estrategias para la gestión de la demanda, este documento se enfoca en el dimensionamiento óptimo de un sistema de acumuladores térmicos, considerando la demanda energética generada por un bloque de apartamentos y las tarifas dinámicas del servicio. El estudio se realiza utilizando datos sintéticos correspondiente a la demanda térmica invernal de un edificio de apartamentos residenciales contextualizado en Trois-Rivières, Quebec, Canadá. Para ello, se emplea un prototipo creado en el entorno virtual de OpenStudio, el cual integra datos meteorológicos y otras características relevantes que brindan una aproximación realista al dimensionamiento óptimo. Se espera que este proceso conduzca a determinar las capacidades de almacenamiento necesarias para satisfacer la demanda térmica al menor costo posible, considerando cada unidad de análisis del edificio clasificada en diferentes zonas térmicas dentro de cada apartamento.

1. Dimensionamiento óptimo de acumuladores térmicos mediante simulación de la demanda térmica durante invierno a través del entorno digital de OpenStudio para cada unidad de un bloque de apartamentos virtual contextualizado en Quebec.

1.1 Planteamiento del Problema

Debido a los diferentes retos que hoy en día enfrentan las redes eléctricas en materia de sostenibilidad y lucha medioambiental, estas han evolucionado al punto de incorporar tecnologías que estudian el patrón de consumo energético, para optimizar el uso de energía eléctrica en unidades de vivienda de carácter residencial. Durante el último año, el consumo de energía eléctrica en Quebec fue de 25 teravatios-hora (TWh), siendo el sector residencial responsable del 18% de este total. Dentro de las viviendas, el consumo eléctrico obedece a diferentes necesidades, pero la más crítica de ellas es la calefacción de espacios, esto debido a las desafiantes condiciones climáticas del invierno canadiense; el 54% de la demanda se destina únicamente a esta tarea [29].

El amplio uso de sistema de calefacción eléctrica para los edificios residenciales en Quebec ha hecho que diversas compañías distribuidoras del servicio han gestionado la generación de picos de demanda mediante sistemas de tarifas dinámicas. La variación del precio de la energía permite redistribuir el consumo energético allanando los picos de demanda horarios. Lo anterior contribuye directamente a que las empresas satisfagan la demanda eléctrica, disminuyendo la capacidad instalada, lo que se ve reflejado en ahorros de costos y recursos [26].

Es por eso, por lo que los sistemas de almacenamiento térmico son tecnologías que se han estudiado en los últimos años debido a la posibilidad de almacenar energía para su consumo posterior, lo que implica un componente significativo de flexibilidad para satisfacer la demanda de una unidad residencial mediante la redistribución de carga. Según (ASHRAE, 1999) existen varios

beneficios en el uso de un ETS (Electric Thermal Storage), pero fundamentalmente, las mayores ventajas se encuentran en la reducción de costos capitales y operativos. El sistema anteriormente planteado, toma aún más relevancia en invierno, donde las estrategias deben priorizarse en los programas de gestión de la demanda (Petersen et al., 2012) debido al amplio incremento en el consumo energético en comparación al resto del año. almacenamiento energético, se puede satisfacer la demanda de una unidad residencial de manera eficiente y a un menor costo, propiciando un consumo inteligente debido a que, en los periodos de carga, el dispositivo compra energía a un menor precio con respecto a las horas de alta demanda, para liberar poder liberar dicha energía almacenada en los horarios de alta ocupación, evitando comprar la energía a una mayor tarifa y disminuyendo la magnitud del consumo en determinados periodos de tiempo [28].

Sin embargo, para el despliegue adecuado de esta tecnología a lo largo de un edificio y satisfacer la demanda térmica eficientemente en el menor costo energético. Es necesario diseñar metodologías de dimensionamiento para estos equipos acorde a las necesidades de la edificación. Esta búsqueda conlleva sobrepasar diferentes obstáculos como la poca disponibilidad y el bajo nivel de información real acerca del consumo eléctrico con el que se cuenta (Domínguez et al, 2022). Sin embargo, una alternativa pertinente, es la generación de datos sintéticos a través de herramientas que permitan el modelado energético de edificios, ya que esta práctica es ampliamente usada. Según el National renewable Energy Laboratory [18]. Las simulaciones a través de herramientas en entornos computacionales son aplicables para la predicción y la optimización del consumo energético [20].

Similarmente, Otro factor que incide en el dimensionamiento de los acumuladores térmicos, es la metodología mediante la cual se propone la capacidad del dispositivo, en función a los requerimientos térmicos de la vivienda. Actualmente en el campo comercial, diversos fabricantes (ENLUR,2018) realizan el dimensionamiento de los acumuladores térmicos a través

de ciertos multiplicadores, que tienen en cuenta ciertos factores referentes al tamaño de la habitación. Sin embargo, esta práctica no garantiza una solución óptima, puede existir un sobredimensionamiento, lo cual no permite explotar el potencial de ahorro de un acumulador térmico.

Actualmente, la literatura muestra metodologías de dimensionamiento a través de modelos matemáticos que están enfocadas en el estado de carga de las baterías (Domínguez et al, 2022). Sin embargo, no muchos trabajos han profundizados en metodologías para el dimensionamiento de acumuladores térmicos. Para este estudio, el trabajo realizado por Daryanian & Bohn, 1993, resulto bastante pertinente para la elaboración de este trabajo ya que fue pionero en la elaboración de un modelo de optimización matemático del costo operativo de un acumulador térmico [20], [22].

El presente trabajo, se enfocará en la creación de datos sintéticos del consumo energético para mostrar su utilidad en aplicaciones como el dimensionamiento de acumuladores térmicos para un edificio residencial. Esto con el fin de valorizar este tipo de información, evidenciando que es un tipo de herramienta pertinente ante la escasez de datos experimentales. así mismo, la aplicación que se mostrará busca generar una aproximación a la demanda de acumuladores térmicos que tiene cada zona térmica del edificio, esto dará pie a ciertos análisis y diversos trabajos que puedan trabajar en profundidad los hallazgos del presente trabajo. La metodología constará de varias etapas, la primera de ellas se enfocará en realizar el modelado virtual del consumo energético del edificio a través del uso del software Openstudio. Este primer objetivo es relevante, pues de esta manera se establecerán los perfiles de la demanda térmica de una edificación típica residencial. Dichos resultados serán una aproximación basada en un modelo de caja blanca, teniendo en cuenta las cargas externas (Condiciones climáticas) climáticas, Junto con las cargas internas (Ocupación y uso). Posteriormente, Tras realizar la simulación y obtener los perfiles de la demanda, se llevará

a cabo la determinación de la capacidad óptima necesaria y la cantidad de acumuladores térmicos requeridos para satisfacer la demanda de cada apartamento. Este proceso se realizará mediante la formulación y resolución de un problema de optimización convexa, donde se busca minimizar la función de costo, que se compone del costo de operación y la inversión inicial, teniendo en cuenta una variable de capacidad óptima para poder dimensionar el acumulador térmico adecuado para cada zona.

1.2 Justificación

La implementación de soluciones que integran almacenamiento energético y emplean la desconexión selectiva de equipos a través de una gestión inteligente de la energía puede desempeñar un papel crucial en la reducción de la dependencia de importaciones costosas de electricidad durante los rigurosos inviernos.

El uso de datos sintéticos como producto de una simulación, es bastante relevante hoy en día. Pues dada la escasez de datos reales, debido a diferentes factores, es pertinente aprovechar el poder computacional y las herramientas que existen hoy en día para conducir esta serie de estudios. Según [18]. Las simulaciones basadas en herramientas que permitan la modelación de edificios son válidas para predecir, controlar e implementar nuevas tecnologías [19].

La implementación de acumuladores térmicos fortalecerá la flexibilidad energética en edificaciones residenciales, lo que optimizará el uso de las infraestructuras y recursos del sistema de producción renovable existente. Además, contribuirá a la integración eficiente de fuentes renovables intermitentes. Este enfoque promueve un cambio en el patrón de consumo al fomentar la adopción de soluciones competitivas económicamente y con alto rendimiento. Asimismo, esta estrategia allana el camino hacia la consecución de los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero, al incentivar ajustes significativos en las redes eléctricas.

Por último, Es importante estudiar este tipo de electrónicos que incentivan al uso racional y eficiente de la energía, Este concepto obedece las acciones que se realicen en las diversas etapas del quehacer energético para optimizar su uso, partiendo de los recursos, pasando por los servicios, hasta llegar al nivel de los consumidores [30]. Este concepto concierne a todo el mundo, por eso la regulación canadiense es bastante detallada a través del estándar “Energy Efficiency Act” [31]. en el cual, en la sección de equipos para la calefacción, establece que todos los fabricantes deben proveer solamente equipos que sean energéticamente eficientes y que logren satisfacer los estándares técnicos federales. Así mismo, el mismo documento resalta la necesidad de publicar información y realizar investigación basadas en cada dispositivo. Es por esto por lo que este trabajo toma relevancia, el investigar acerca de los acumuladores térmicos incentiva a que aumente el interés adoptar este sistema de calefacción debido a la divulgación de sus beneficios a corto y a largo plazo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Dimensionar los acumuladores térmicos de un edificio residencial típico de Quebec, a través de la aplicación de técnicas de optimización utilizando datos sintéticos provenientes del modelado virtual del consumo energético para determinar capacidades óptimas y el número de acumuladores térmicos que permitan suplir la demanda térmica para cada unidad de análisis (Apartamento).

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un modelado térmico virtual de un bloque de apartamentos simulado mediante un software que permita emular y cuantificar la demanda térmica de la unidad de análisis (apartamento) para obtener datos sintéticos referentes al consumo energético y los requerimientos térmicos del edificio estudiado.
- Formular un problema de optimización convexo teniendo en cuenta los datos obtenidos de la simulación para poder minimizar la función de costo encontrando la capacidad óptima requerida y poder dimensionar el número de acumuladores térmicos para cada unidad de análisis (apartamento).
- Analizar los resultados obtenidos después del dimensionamiento para emitir un concepto final desde una perspectiva comercial y realizar una serie de recomendaciones basadas en la literatura estudiada.

1.4 Estado del arte.

Dentro de la distinta literatura relacionada con el tema estudiado hay diferentes estudios que pretenden mostrar cómo se puede trabajar con el uso racional y eficiente de la energía a través del uso de sistemas de almacenamiento térmico. Este campo ha crecido exponencialmente en los últimos años debido a los esfuerzos mundiales por acercarse cada vez más a los objetivos de desarrollo sostenible [29]. A continuación, se mencionan algunos trabajos usados como referencia para la realización del presente estudio, dentro de esta sección se resaltan los trabajos cuyo enfoque está altamente relacionado con los objetivos de este trabajo y que por ende son las principales referencias para la elaboración. estos artículos están organizados cronológicamente, desde 1993 hasta 2022 evidenciando la tendencia hacia el desarrollo investigativo en este tema:

- (Daryanian & Bohn, 1993) “Sizing of Electric Thermal Storage Under Real Time Pricing”: Este estudio destaca la importancia de las tarifas fijas y las tarifas dinámicas para el uso eficiente de los acumuladores térmicos. El Almacenamiento Térmico Eléctrico para calefacción implica desplazar la carga eléctrica fuera de sus momentos reales por lo tanto Las tarifas dinámicas han promovido el uso de estos sistemas al ofrecer precios más bajos en períodos de menor demanda. Este artículo es importante para el presente documento, porque se realizó un análisis del costo de operación del acumulador utilizando técnicas numéricas de optimización. Este articulo evidencio un amplio ahorro en el precio de carga del dispositivo en función a una tarifa dinámica, valorizando esta tecnología dentro de dicho contexto [22].
- (Syed, 2011) “Electric Thermal Storage Option for Nova Scotia Power Customers: A Case Study of a Typical Electrically Heated Nova Scotia House”: El presente estudio, realizo una modelación virtual de la referencia de un acumulador térmico perteneciente a una compañía en específico, esta simulación se realizó en un software propuesto por el autor (ESP-r), tras los datos obtenidos de la simulación se realizó el dimensionamiento del artefacto de esta compañía adecuado para una casa tipo. Este estudio es una referencia importante en materia de dimensionamiento y de referencias comerciales; Por un lado, se le valida el dimensionamiento en función a la capacidad del equipo, teniendo en cuenta las opciones existentes en el mercado, de la misma forma que trabajar tan ligado con una serie de productos hace que se convierta en una referencia importante para incorporar el componente comercial de los acumuladores térmicos dentro del problema de optimización que se busca plantear [26].

- (Dominguez et al., 2022) "Distributed Co-simulation for Smart Homes Energy Management in the Presence of Electrical Thermal Storage": El presente artículo se encargó de crear una herramienta para realizar simulaciones de acumuladores térmicos mediante una estructura de co-simulación multiplataforma, por un lado la física del elemento se modela dentro de un componente externo y al momento de realizar una simulación de consumo, esta se acopla a una interfaz que proyecten geometría y cargas eléctricas. Esta herramienta fue basada en la recolección de datos reales del consumo de una unidad de almacenamiento térmico, para que se pudiera estimar con precisión las ratios de carga y descarga de dicho equipo. Este artículo realiza una contribución importante, ya que se crea una herramienta especializada en modelar virtualmente los acumuladores térmicos, esta es una forma de obtener datos y realizar un análisis más profundo de costos y rendimiento [20].
- (Devia et al., 2021) "An Evolutionary Approach to Modeling and Control of Space Heating and Thermal Storage Systems": el artículo muestra la importancia de la eficiencia energética dentro de la red, especialmente por el crecimiento de la demanda en el sector residencial. Esto se ha destacado en regiones con necesidad de confort térmico, como el invierno canadiense, donde más del 60% del consumo energético residencial se destina a sistemas de calefacción. Es por eso que este artículo propone un algoritmo de optimización enfocado en la arquitectura, para la incorporación de acumuladores térmicos a nivel residencial. Los resultados obtenidos ratifican la importancia de implementar estas tecnologías de almacenamiento de manera óptima ya que se puede realizar un ahorro importante a nivel de costos, sin perder confort térmico [24].

- (Storry et al., 2013) “The multi-objective optimisation of electrical thermal storage to compensate for the intermittency and variability of renewable generation in distribution networks”: Los autores tienen el enfoque de optimización multiobjetivo centrado en el almacenamiento térmico. Utilizaron tanques de agua caliente como almacenamiento térmico, en su caso de estudio y examinaron su impacto de penetración en la red, la adición de fuentes de energía renovable provenientes de parques eólicos. Si bien el estudio proporciona una perspectiva interesante, se utilizó un enfoque de optimización metaheurística con una falta de optimización de la operación del sistema de almacenamiento térmico. Es de enfatizar que los métodos de optimización metaheurística destacan por la factibilidad que brindan para trabajar funciones objetivo no convexas, pero a menudo luchan con resultados inconsistentes en la localización de óptimos locales en lugar de globales. En conclusión, de este trabajo, se muestra que el sistema de almacenamiento térmico con ladrillos cerámicos es una solución efectiva para los propietarios para optimizar el costo de la factura y obtener el confort deseado simultáneamente [23].
- (Wong & Pinard, 2017) “Opportunities for Smart Electric Thermal Storage on Electric Grids with Renewable Energy”: el mencionado trabajo estableció una metodología donde se utilizó la dinámica de la Señales de precios del ToU (tiempo de uso) y un enfoque de programación lineal para la operación de un sistema de almacenamiento térmico con la búsqueda de integrarlo con fuentes de energía convencionales como renovables. A pesar de presentar un análisis de emisiones de gases de efecto invernadero y un análisis de inversión en para un acumulador térmico, este trabajo no presento algún método para optimizar la capacidad de estos dispositivos, se limitó a partir de una capacidad fija [14].

En conclusión los principales referentes dentro de la literatura estudiada muestra que las Diferentes metodologías aplicadas para el dimensionamiento de sistemas de almacenamiento térmico, por un lado, se encuentran enfocadas en sistemas de calor latente como tanques de agua (Daryanian & Bohn, 1993) (Storry et al., 2013), y por otro lado se encuentra que los distintos modelos conllevan a soluciones sub optimas [9], [23].

(Domínguez-Jiménez et al., 2023) destaca la falta de modelos matemáticos que conlleven a soluciones optimas en materia de almacenadores tiempos, lo que conllevo a basar su problema de optimización en los modelos de optimización del estado de carga de las baterías. Similarmente, la literatura muestra que la generación de datos sintéticos es ampliamente usada para el planteamiento de este tipo de optimizadores, de los artículos mencionados anteriormente, todos presentan dentro de su metodología la obtención de datos a través de softwares o algoritmos, algunos de ellos como (Wong & Pinard, 2017) utilizan datos provenientes de técnicas de “forecasting” y suposiciones acerca de los datos. Este trabajo abordara pretende profundizar en las técnicas de optimización para el dimensionamiento de acumuladores térmico-eléctricos a nivel residencial, para ello se elaborará un prototipo dentro del entorno virtual de openstudio y se validaran los hallazgos a través del análisis de la operación durante el periodo invernal [21], [14].

2. Marco teórico

2.1 Generalidades

2.1.1 Localización: Trois-Rivières

La ciudad de Trois-Rivières es el centro urbano más grande de la región de Mauricie. Con una población de 134.012 habitantes en 2014 [1]. Se experimenta un clima continental húmedo, con inviernos fríos y nevados, y veranos cálidos y húmedos.

2.1.1.1 Características climáticas. De acuerdo con la información suministrada por Canadian Climate Data para la región de Quebec, en el invierno se presentan condiciones climáticas marcadas por temperaturas extremadamente frías y nevadas abundantes. Con una media de temperatura que oscila entre los -15°C y -20°C , y con picos que pueden llegar a -30° . Las nevadas son frecuentes y el viento helado que sopla desde el norte agrava la sensación térmica [32].

2.1.1.2 Desarrollo sostenible. El enfoque de desarrollo sostenible de la ciudad de Trois-Rivières apunta a un equilibrio entre el desarrollo económico, la calidad de vida de los ciudadanos y la protección del medio ambiente [2].

2.1.1.3 Plan de adaptación al cambio climático. Trois-Rivières es el primer municipio de Quebec que cuenta con un Plan de Adaptación al Cambio Climático. Este plan le permite a la Ciudad identificar los impactos que el cambio climático tendrá en nuestra infraestructura para poder prepararnos mejor. Este plan, que combina la experiencia de especialistas en ingeniería, medio ambiente y gestión de recursos, prevé una cincuentena de acciones a tomar [2].

El Plan de Adaptación al Cambio Climático incluye iniciativas encaminadas a reducir los gases de efecto invernadero, reducir el efecto de las islas de calor, mejorar la gestión del agua y una mejor planificación para el desarrollo de la Ciudad de acuerdo con las limitaciones identificadas en su territorio [2].

2.1.2 Hydro-Quebec

Empresa líder reconocida en energía eléctrica y sistemas de transmisión a gran escala. Hydro-Quebec proporciona energía eléctrica confiable y servicios de alta calidad. Desarrolla y exporta fuentes de energía limpias y renovables [3].

Hydro-Québec genera electricidad para abastecer el mercado quebequense y vende su excedente de producción en los mercados mayoristas. Es el mayor productor de electricidad de Canadá y uno de los mayores productores de energía hidroeléctrica del mundo [3].

2.1.2.1 Generación de energía eléctrica. Se operan 61 estaciones hidroeléctricas generadoras de energía, siendo de las empresas con mayor producción eléctrica en el mundo. Cerca del 100% de la electricidad producida se genera usando agua, siendo una opción de generación con muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y sin residuos tóxicos [3].

La generación eléctrica de Hydro-Québec comprende 61 estaciones hidroeléctricas y 24 plantas térmicas con una capacidad instalada total de 37,2 GW. Las instalaciones también incluyen

28 grandes embalses con una capacidad de almacenamiento combinada de más de 176 TWh, así como 681 presas y 91 estructuras de control [3].

Las estaciones hidroeléctricas generan aproximadamente una cuarta parte de toda la electricidad utilizada en el mundo. Con acceso a vastas reservas de agua, Hydro-Québec utiliza agua para generar casi toda su producción energética. De esta forma, la empresa ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [3].

Las centrales térmicas cuestan más de operar y, debido a que quemas combustibles fósiles emiten más contaminantes en comparación con las centrales hidroeléctricas. Estas instalaciones representan sólo una pequeña parte de la capacidad de generación total de Hydro-Québec, También desempeñan un papel vital para satisfacer las necesidades energéticas de base y pico de Québec. Además, son útiles para suministrar energía a regiones remotas y fuera de la red [3].

2.1.2.2 Transmisión y distribución de energía eléctrica. El sistema de transmisión es el más extenso de América del Norte, con más de 34,000 km de líneas de alta tensión que van desde grandes estaciones generadoras en áreas remotas hasta las zonas más pobladas de la provincia. Apoyadas por torres, estas líneas transportan grandes cantidades de electricidad a comunidades de todo Quebec y a los mercados de exportación. Se suministra la electricidad a través de las líneas de distribución, que se extienden por uno 260.000 km [3].

2.1.2.3 Tarifas de la electricidad. Hydro-Québec establece tarifas nacionales específicas para los clientes residenciales, para casos de consumo residenciales y agrícolas. La empresa ofrece opciones de tarifas que incluyen:

- Tarifa D: se aplica al uso doméstico, es decir, al uso de electricidad en una vivienda.

También aplica a las granjas [3].

- Tarifa PD: se aplica a clientes residenciales y agrícolas, cuando la demanda máxima de potencia ha alcanzado los 50 kW o más al menos una vez durante los últimos 12 meses. También aplica para parques cuya demanda máxima de energía alcance este umbral [3].
- Tarifa DM: se aplica para edificios de apartamentos o residencias comunitarias que tengan varias viviendas [3].
- Tarifa DN: se aplica al uso doméstico, es decir, al uso de electricidad en una vivienda, cuando la electricidad es suministrada por un sistema aislado ubicado al norte del paralelo 53, excepto el sistema Schefferville [3].
- Tarifa D-Flex: Aplicada aquellos consumidores que, a través de sistemas de gestión energética, son capaces de usar menos electricidad en los periodos de alta demanda. Es más barata que la tarifa base en invierno, pero su precio aumenta durante los picos de demanda. Una tarifa diseñada para incentivar la flexibilidad energética en edificios, la tarifa puede alcanzar hasta los 55.132 ¢/kWh [3].

2.1.3 Acumuladores térmicos

Se consideran acumuladores térmicos eléctricos al ser identificados como un medio para reducir la demanda eléctrica máxima y los altos costos de electricidad en horas pico [4].

2.1.2.1 Electric Thermal Storage (ETS). Esta tecnología garantiza la seguridad energética, eficiencia y calidad ambiental. Existen aplicaciones en que las aplicaciones térmicas en que las aplicaciones térmicas en las que la calefacción y refrigeración se producen eléctricamente (calefacción, agua caliente, refrigeración y aire acondicionado), de modo que los sistemas de acumuladores térmicos eléctricos ayudan a compensar el desajuste entre la disponibilidad de electricidad renovable y la demanda de electricidad [4].

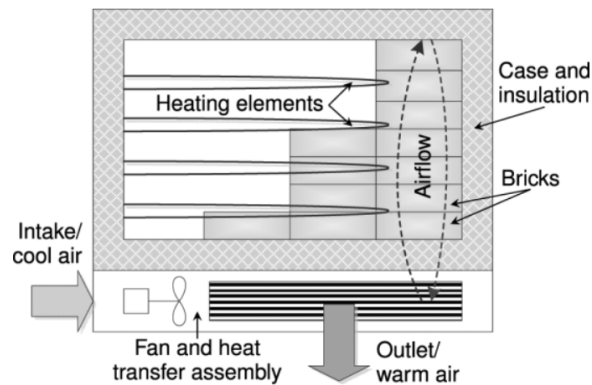
A diferencia de los electric baseboard heaters tradicionales, los acumuladores térmicos eléctricos convierten la electricidad en calor durante las horas de menor actividad, cuando la demanda y precio de la electricidad es más baja. Se diseñan con ladrillos cerámicos dentro de las unidades, debido a que este material almacena grandes cantidades de calor durante largos periodos de tiempo [5]. En el invierno, durante los periodos fuera de pico, el ETS carga y simultáneamente suministra calor para cumplir con los requisitos de demanda. Por el contrario, durante los periodos pico, el equipo depende exclusivamente de la energía almacenada en el para satisfacer los requisitos de la demanda [4].

Las unidades de almacenamiento térmico eléctrico (ETS, por sus siglas en inglés) son sistemas de almacenamiento de energía térmica utilizados para modificar el perfil de carga de calefacción de un edificio. Disponibles tanto en aplicaciones residenciales como comerciales, almacenan calor para ser utilizado posteriormente para calefacción, manteniendo los edificios a una temperatura confortable [14].

Básicamente, consisten en elementos calefactores eléctricos entre capas de ladrillos térmicos alojados en una caja aislada, como se muestra en la Figura 1. La energía térmica se almacena en los ladrillos, que pueden alcanzar cientos de grados Celsius. Cuando se necesita para calefacción del espacio, la energía térmica se extrae mediante convección forzada. Algunos

modelos están diseñados para la calefacción de habitaciones, mientras que otros pueden sustituir a un horno o caldera central.

Figura 1. *Acumulador térmico eléctrico – Ilustración.*



Tomado de [14].

2.2 Datos sintéticos

Los datos sintéticos son aquellos datos generados artificialmente para simular características de conjuntos de datos reales. Estos datos se crean utilizando algoritmos y modelos estadísticos que imitan el comportamiento y la distribución de los datos reales, pero no representan información experimental.

2.2.1 OpenStudio Analysis Framework

OpenStudio es una colección de herramientas de software multiplataforma (Windows, Mac y Linux) para respaldar el modelado energético de todo el edificio mediante EnergyPlus y el análisis avanzado de la luz natural mediante Radiance. OpenStudio es un proyecto de código abierto para facilitar el desarrollo comunitario, la extensión y la adopción del sector privado [15].

Esta plataforma hace que la optimización y el análisis paramétrico de los modelos energéticos de edificios sean accesibles para arquitectos, ingenieros, diseñadores y formuladores de políticas [16].

Los flujos de trabajo personalizables permiten el análisis de múltiples desafíos en el proceso de diseño y modernización del edificio, utilizando la misma plataforma de simulación. Los algoritmos de optimización y calibración se utilizan para encontrar entradas que minimicen una función objetivo, como la energía de calefacción o refrigeración, para un problema de diseño óptimo [16].

La arquitectura de OpenStudio Analysis Framework aprovecha un sistema para administrar aplicaciones en contenedores con el fin de organizar diferentes instancias que se comunican entre sí y con varias aplicaciones externas que definen problemas a través de una interfaz de programación de aplicaciones bien definida. Una configuración típica consta de una computadora o nodo de computación que funciona como nodo de servidor y varias otras computadoras o nodos de computación que funcionan solo como trabajadores [16].

El sector privado y las organizaciones gubernamentales han utilizado OS con éxito, ya sea a través de sus capacidades algorítmicas y de visualización existentes o vinculando los resultados de la simulación a gran escala con herramientas analíticas y de visualización externas. Los socios globales incluyen gobiernos, laboratorios nacionales y la industria [16].

2.3 Optimización convexa

La convexidad es una propiedad ampliamente utilizada en matemática aplicada, más en concreto en optimización. La optimización convexa es una de las ramas más desarrolladas hasta el momento en el campo de la optimización [6].

Es la simplicidad que estas ofrecen gracias a la aparición de fenómenos globales que sustituyen a fenómenos locales que se dan en funciones arbitraria. Los extremos relativos de funciones convexas son además extremos absolutos y de hecho son mínimos, lo cual se traduce en un ahorro computacional considerable [7].

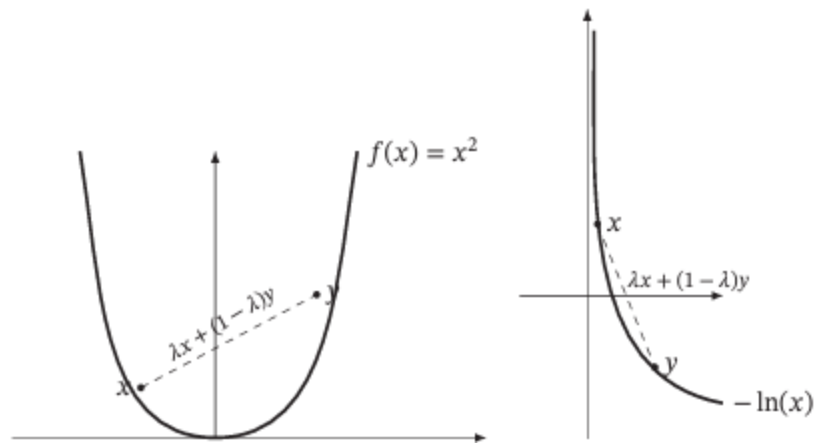
2.3.1 Funciones convexas.

Una función convexa se establece desde el cumplimiento de la desigualdad de Hansen mostrada a continuación, en donde se corrobora que todo valor adoptado por la función f con dominio convexo será inferior al valor que adopte su epígrafe en un intervalo [7].

$$f(\lambda \cdot x_1 + (1 - \lambda) \cdot x_2) \leq \lambda \cdot f(x_1) + (1 - \lambda) \cdot f(x_2) \quad (1)$$

Es decir, Una función convexa implica que cualquier segmento de recta entre dos puntos, está por encima de la función [7], como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Función convexa – Ejemplo.



Tomado de [8].

Las funciones convexas son importantes en matemáticas y en diversas aplicaciones porque tienen muchas propiedades útiles y pueden modelar una variedad de fenómenos en la naturaleza y en la ciencia [9].

2.3.2 Problema de optimización convexa

La optimización no lineal presenta diversos desafíos, y entre ellos destaca la problemática específica de la optimización convexa, que exhibe propiedades que la vuelven especialmente intrigante [6]. En este contexto, se define un problema de optimización (Ω) como convexo si y solo si se cumplen las siguientes condiciones:

- La función objetivo $f_0(x)$ se caracteriza por ser convexa [6].
- La región factible Q se configura como un conjunto convexo. Para que Q sea convexo, es imperativo que las restricciones de igualdad sean funciones afines, y las restricciones de desigualdad ($\leq$) sean convexas [6].

Los problemas de optimización convexa exhiben algunas propiedades notables, entre las cuales se destacan que el teorema de dualidad débil se cumple con igualdad, lo que implica que el óptimo del problema dual y el primal coinciden [6]. Un problema de optimización matemática de la forma:

$$\min f(x); x \in \Omega \quad (2)$$

Es un problema de optimización convexa si la función objetivo es convexa y el espacio de soluciones [6]. En términos prácticos, un problema de optimización de la forma:

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \\ g_i(x) &= 0 \\ h_j(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Es convexo siempre y cuando la función objetivo sea convexa y estas últimas sean afines a la primera. Los problemas de optimización convexa tienen características teóricas interesantes y pueden ser resueltos eficientemente en la práctica. De hecho, se puede asegurar que la complejidad computacional de un problema está mucho más relacionada con la convexidad que con la linealidad. Por ejemplo, un problema convexo y cuadrático suele ser computacionalmente menos demandante que un problema de programación lineal-entera. Por ello, es importante establecer condiciones de convexidad, así como formas de aproximaciones convexas [8].

2.3.3 CVXPY

CVXPY es una herramienta libre de Python que permite escribir modelos de optimización de una forma natural para, posteriormente, invocar a paquetes de optimización matemática tales como GUROBI o ECOS, la mayoría de estos paquetes usan métodos basados en puntos interiores [8]. Además, CVXPY es una librería enfocada en solucionar problemas de optimización convexa, donde la función objetivo como las restricciones son de naturaleza convexa. Lo anterior, asegura la unicidad en la solución y una mayor facilidad para encontrar los resultados.

CVXPY es desarrollado y mantenido por Steven Diamond, Akshay Agrawal, Riley Murray, Philipp Schiele y Bartolomeo Stellato, con muchas otras personas que contribuyen significativamente. Una lista no exhaustiva de personas que han dado forma a CVXPY a lo largo de los años incluye a Stephen Boyd, Eric Chu, Robin Verschueren, Jaehyun Park, Enzo Busseti, AJ Friend, Judson Wilson, Chris Dembia y Philipp Schiele [10].

3. Método

3.1 Generalidades.

3.1.1 Metodología de investigación.

El presente proyecto pretende la consecución de los objetivos planteados a través de una metodología que consta de varias fases. Cada una de ellas con actividades específicas que permitan desarrollar tanto la generación de datos sintéticos como el dimensionamiento de la capacidad optima de los Acumuladores térmicos electricos a través optimización determinista, despreciando todo tipo de incertidumbre proveniente de los datos de la demanda.

En concordancia con lo anterior, esta investigación tiene enfoque cuantitativo. Lo anterior, se justifica debido a la creación y análisis de datos mediante técnicas matemáticas que permiten entender el fenómeno desde la perspectiva que ofrece el análisis numérico.

En las primeras fases, los dos primeros objetivos específicos del proyecto se abordan desde una perspectiva cuantitativa, utilizando datos numéricos y técnicas de formulación matemática. Esto permite un análisis preciso en relación con la capacidad óptima requerida y la cantidad de acumuladores térmicos necesarios para suplir la demanda térmica. Igualmente, el último objetivo implica un análisis que se basa en los resultados obtenidos al alcanzar los objetivos anteriores. Este análisis se basará en gráficas y tablas, lo cual hace que esta etapa sea considerada de igual forma cuantitativa.

Las variables fundamentales que inciden en el problema son la demanda térmica, la capacidad requerida y el costo. Estos tres parámetros constituyen el núcleo del entorno del proyecto. En primer lugar, la demanda térmica se precisa para determinar la cantidad de energía necesaria para garantizar el confort de los usuarios en cada apartamento. La capacidad requerida, por otro lado, es una variable clave, ya que fundamenta el dimensionamiento de los acumuladores

térmicos en cada unidad. En última instancia, el costo es la variable que se busca minimizar, considerando una capacidad requerida para satisfacer la demanda térmica, estableciendo así una mayor eficiencia y la optimización de los recursos.

La técnica de recolección de datos será la simulación del entorno térmico y consumo energético, mediante el modelado virtual de un edificio residencial típico canadiense, en el software OpenStudio. Este modelo, será un modelo de caja blanca, lo cual permitirá obtener una aproximación a los datos reales, que está sujeta a las consideraciones físicas que puedan delimitar el alcance del modelo.

De igual forma se tendrá en cuenta condiciones climatológicas de la zona, (Trois-Rivieres, Quebec, Canadá). Para lo cual se recurrirá al registro de estaciones climatológicas de EnergyPlus la cual es una plataforma abierta que brinda esta información en archivos digitales. Así mismo el modelo tendrá en cuenta cargas de eléctricas y comportamientos de ocupación. Para obtener estos datos se recurrir a la documentación de ASHREA (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers), determinando los valores estándares de los parámetros anteriormente mencionados, para edificios residenciales. Tras la modelación se busca obtener los perfiles de la demanda térmica del invierno canadiense.

Para abordar el diseño de la capacidad requerida de los acumuladores térmicos es necesario enfatizar en el tipo de sistema que se trabajara. Para este estudio, se tomará de referencia el dispositivo de almacenamiento electrotérmico de energía compuesto por bloques de magnesia, calentados a través de una resistencia. Estos bloques que alcanzan altas temperaturas están rodeados de placas aislantes, lo que garantiza que el calor solo será liberado por conexión cuando se abra la ventilación de este [11]. Dichos aparatos son destinados para calefacción a nivel residencial y son distribuidos exclusivamente por fabricantes certificados por el gobierno federal de cada provincia en el caso de Canadá [12].

Con el objetivo de lograr un costo mínimo, se pretende formular un problema de optimización convexa. La función de costos se establecerá como el objetivo a minimizar y estará compuesta por el costo operativo. Este último se calcula multiplicando la demanda por el valor de la tarifa del servicio y sumándole un componente que refleje el capital de inversión, es decir, el precio del acumulador en relación con su capacidad.

De esta manera, la meta es determinar la capacidad óptima necesaria para un acumulador térmico, logrando así un equilibrio eficiente entre la eficacia operativa y la inversión de capital mínima.

Por último, se pondrá en consideración los resultados obtenidos y se evaluará dentro del ámbito comercial, a nivel local, donde se entregará la mejor solución que requiere cada unidad inmobiliaria para suplir la demanda. Es decir, Se utilizarán fabricantes locales como referencia para establecer el dimensionamiento final requerido y así mismo se emitirá un análisis acorde a toda la literatura estudiada.

3.2 Obtención de datos sintéticos.

3.2.1. Procedimiento de modelado virtual en el framework de OpenStudio.

La modelización de edificios desempeña un papel importante en predecir y optimizar el consumo de energía de los activos, dada la falta de datos experimentales. Esta práctica permite anticipar diferentes escenarios para aplicar estrategias de utilización eficiente de los recursos y minimización de costos [13].

Este estudio se centra en la generación de datos a través del uso del marco de trabajo OpenStudio, que comprende diversas herramientas para aplicaciones como el dimensionamiento de componentes de calefacción. Las interfaces gráficas de OpenStudio y SketchUp simplifican la

modelización detallada de la arquitectura propuesta, debido a su compatibilidad con el motor de simulación EnergyPlus. La facilidad de operación y el intercambio de información entre estas interfaces permiten a los usuarios generar modelos con facilidad.

El diagrama representado en la Figura 3 muestra las conexiones entre las plataformas utilizadas para diseñar la estructura para la simulación. Además, se muestran los roles que cumple cada plataforma en el proceso de modelado.

Figura 3. *Proceso de obtención de datos.*



Fuente: propia

Primero, se utiliza el plug-in de SketchUp para OpenStudio para crear un archivo IDF, el cual contiene las entradas iniciales al modelo. En esta fase inicial, se dibujó toda la superficie del edificio: paredes, ventanas y puertas. Una vez hecho esto, es posible diferenciar entre los tipos de superficies a través de la interfaz gráfica.

Luego, se establece la interacción entre las superficies exteriores e interiores, un aspecto crucial para la modelar la transmisión de calor de manera precisa. Posteriormente, utilizando los renders de SketchUp, se crearon las zonas térmicas del edificio acorde a los requerimientos térmicos del edificio. Este archivo se exportó a OpenStudio a través del complemento de SketchUp.

Una vez que el software cargó el archivo, se importaron los datos climáticos correspondientes a la ubicación y tiempo de estudio: Trois-Rivières, Quebec, Canadá, para el año 2022. Esta data climatológica se obtiene en formato tipo EPW y DDY, ambos extraídos del portal: “*Climate One Building*”, y están validados por ASHRAE y el Servicio Meteorológico Canadiense.

Después de la configuración climática, se importó una plantilla de archivo proveniente de ASHRAE descargada de BCL (Building Components Library), que contiene ajustes estandarizados para cada zona climática del continente. En este caso, dado que el edificio consta de apartamentos de altura media y la ciudad se encuentra en la zona climática 6, se seleccionaron ajustes consistentes para esta zona.

Como siguiente paso, se verifican y ajustan, si es necesario, las propiedades de los materiales asignados a cada superficie mediante las plantillas en OpenStudio.

A continuación, se procede a definir los tipos de espacios según los datos que fueron importados. Esta configuración obedece al uso para el cual se fue diseñado cada espacio. Se establecieron dos tipos de espacios en el edificio: apartamentos y pasillos (comunitarios), como se mencionó previamente, los valores otorgados están respaldados por los estándares de ASHRAE para la zona climática.

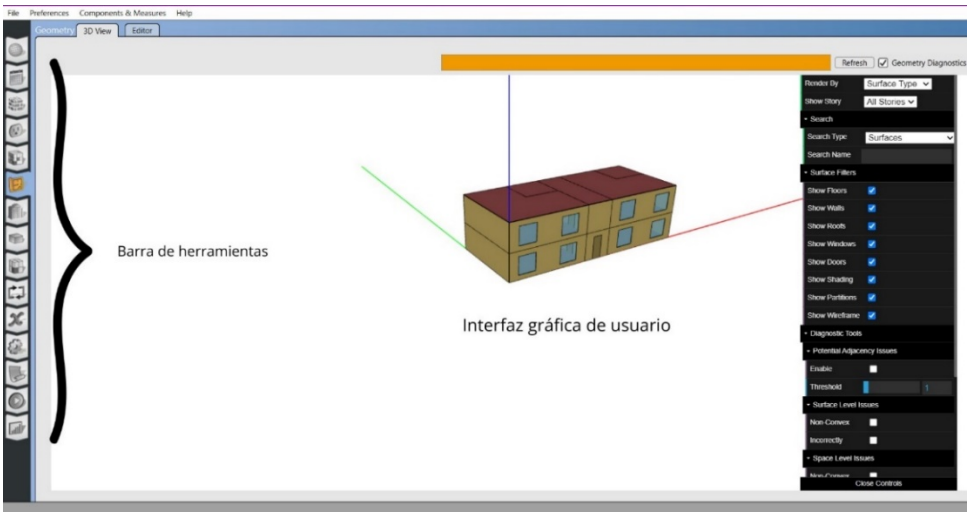
Dentro de los comportamientos de ocupación, se destaca la operación del termostato tanto de los apartamentos como del pasillo, con el objetivo de mantener una temperatura estable y constante, siguiendo los requisitos de cada zona térmica.

Al igual que los espacios, las zonas térmicas se clasifican en apartamentos y pasillos. Sin embargo, se estableció una zona térmica para cada apartamento y para cada pasillo, cada una de ellas con su propio termostato. Así mismo, cada zona térmica cuenta con un sistema de calefacción independiente y la demanda térmica a través de un tradicional *Electric Baseboard Heater*.

Este dispositivo ampliamente comercializado para uso residencial se introdujo al modelo a través de una configuración de capacidad *autodimensionada*, es decir, que al momento de la simulación el software emplea toda la potencia requerida para satisfacer la demanda térmica. Esto implica que el consumo eléctrico durante la simulación está directamente relacionado con el mantenimiento de la temperatura que se asigne al termostato en cada instante. Esta opción es bastante pertinente, pues permite que la energía almacenada pueda suplir la demanda y que no haya ninguna hora insatisfecha, en materia de confort térmico durante todo el invierno.

La Figura 4 ofrece una visión general de la interfaz gráfica de usuario de OpenStudio. En ella, se destaca una barra de herramientas en el lado izquierdo, que alberga todas las funcionalidades que posibilitaron la creación de este prototipo y que fueron mencionadas previamente.

Figura 4. Visión panorámica de OpenStudio.



Tomado de OpenStudio.

A continuación, en la Figura 5 se presenta otra imagen del software OpenStudio, resaltando la amplitud de características que posee el modelo en cuestión.

Figura 5. Características del modelo en OpenStudio.

The screenshot shows the 'Properties' window in OpenStudio, specifically the 'General' tab. It displays a table with columns for Space Name, Story, Thermal Zone, Space Type, Default Construction Set, Default Schedule Set, and Part of Total Floor Area. The table lists various spaces like TZ Apartment 1 Space, TZ Apartment 2 Space, TZ Apartment 3 Space, TZ Apartment 4 Space, TZ Corridor 1 Space, TZ Corridor 2 Space, TZ Room Apartment 1 Space, TZ Room Apartment 2 Space, TZ Room Apartment 3 Space, and TZ Room Apartment 4 Space. Each row has checkboxes for selection and buttons for applying settings.

Space Name	Story	Thermal Zone	Space Type	Default Construction Set	Default Schedule Set	Part of Total Floor Area
TZ Apartment 1 Space	Story 1	TZ Apartment 1	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Apartment 2 Space	Story 1	TZ Apartment 2	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Apartment 3 Space	Story 2	TZ Apartment 3	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Apartment 4 Space	Story 2	TZ Apartment 4	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Corridor 1 Space	Story 1	TZ Corridor 1	Corridor Space Type		Schedule	☒
TZ Corridor 2 Space	Story 2	TZ Corridor 2	Corridor Space Type		Schedule	☒
TZ Room Apartment 1 Space	Story 1	TZ Room Apartment 1	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Room Apartment 2 Space	Story 1	TZ Room Apartment 2	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Room Apartment 3 Space	Story 2	TZ Room Apartment 3	Apartment Space Type		Schedule	☒
TZ Room Apartment 4 Space	Story 2	TZ Room Apartment 4	Apartment Space Type		Schedule	☒

Tomado de OpenStudio.

La imagen anterior representa la paleta "*spaces*" en la barra de herramientas, donde se organizan las generalidades del modelo según los tipos de espacios. Se pueden apreciar diversas columnas y pestañas con asignaciones específicas. Esta pestaña actúa como el centro de control para la inclusión de detalles en el modelo. En la parte superior, se presentan todos los tipos de características mencionadas en esta metodología, como cargas, superficies y propiedades. Esto facilita la validación del procedimiento previamente descrito para la creación de este prototipo.

Es de esta forma que se constituye un modelo de alto detalle, donde se considera la interacción con las condiciones climáticas externas como la una dinámica interna que tiene el edificio. En este contexto, varias zonas térmicas con diferentes requerimientos convergen e interactúan a través de la termodinámica, influenciada por las características y propiedades que tiene cada superficie.

Finalmente, el proceso de simulación concluye ajustando las variables de salida para que OpenStudio brinde la información requerida. Para este estudio, se consideró exclusivamente la potencia eléctrica requerida por el sistema de calefacción, en cada instante de tiempo (1 hora). La simulación se realiza a través del motor EnergyPlus, para el cual el software traduce el archivo OSM a un nivel bajo y devuelve los resultados en un archivo HTML y un archivo de salida CSV, del cual se grafican los datos y se generan perfiles de demanda.

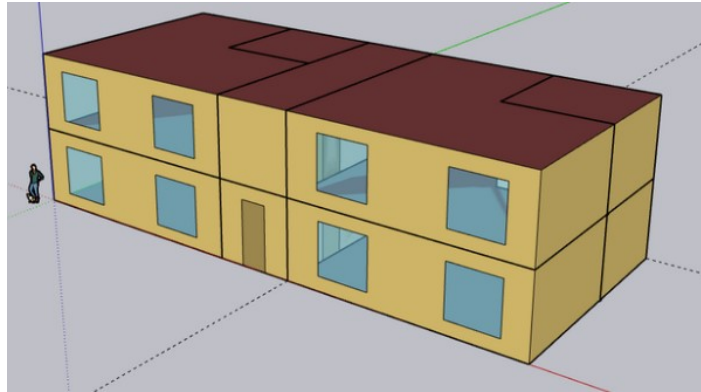
El procedimiento descrito anteriormente obedece al manejo de todo el framework de OpenStudio que mediante sus distintas extensiones permite generar archivos con un alto número de parámetros otorgando realismo a los resultados. Las versiones de los softwares trabajados son: OpenStudio 3.9, SketchUp 2023 y Energyplus 23.1. Cabe mencionar que todos ellos son de licencia abierta, lo que hace accesible el uso y aplicación de este tipo de herramientas para análisis como los que presenta este trabajo.

3.2.2 Caso de estudio.

Con el propósito de examinar el consumo energético en una edificación residencial durante los meses de invierno, se ha diseñado un prototipo de edificio dentro de un entorno virtual. Este prototipo incorpora las características distintivas de las construcciones en la región, considerando los requisitos específicos para la zona climática 6 según ASHRAE y las normativas locales pertinentes, según se detalla en el reglamento Canadian Commission on Building and Fire Codes del 2017.

La arquitectura del edificio se inspiró en bloques de apartamentos ya existentes, aunque es importante resaltar que se trata de una estructura concebida exclusivamente en un entorno virtual. La estructura consta de un bloque tradicional de 2 pisos con una superficie de construcción de $192,9 \text{ m}^2$ (área en planta). Cada piso tiene dos unidades de apartamentos, y cada apartamento cuenta con dos zonas térmicas (habitación y sala) y un pasillo que separa los apartamentos. El área total de cada unidad es de $81,2 \text{ m}^2$, donde la habitación principal cuenta con 16 m^2 y la sala con $65,2 \text{ m}^2$.

En la Figura 6, se muestra una vista general del prototipo virtual diseñado para capturar la demanda térmica de un edificio típico residencial en el contexto del invierno canadiense.

Figura 6. *Edificio residencial modelado*

Tomado de OpenStudio.

En adición a la anterior imagen, que ofrece una perspectiva visual del edificio residencial diseñado para el estudio, se muestra a continuación la Tabla 1, que plasmas de manera puntual las características generales del prototipo, dentro de ellas destacan la localización, las condiciones climáticas, la distribución del espacio, entre otras cuestiones.

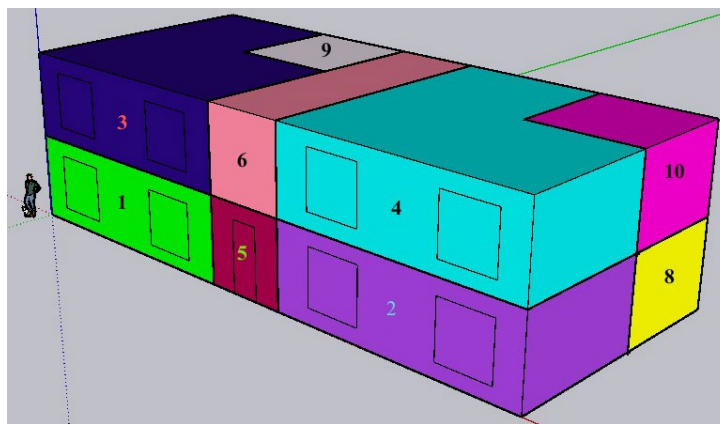
Tabla 1. *Características generales del prototipo.*

Localización y descripción general.	
Localización	Trois-Rivières, QC, Canada
Climatología	Trois-Rivières, QC, Canada- Invierno (Dic-Mar) 2022
Número de unidades	4
Área total (m ²)	192,9
Numero de zonas térmicas	10
Área de cada unidad (m ²)	81.2
Área de la sala de cada apartamento (m ²)	65.2
Área del cuarto de cada apartamento (m ²)	16
Sistema de calefacción	Calefacción por: <i>Electric Baseboard Heaters</i>
Altura de entrepiso (m)	3

Tomado de OpenStudio.

Es importante destacar que el sistema de calefacción adoptado en cada una de las zonas térmicas fue un dispositivo conocido como “*Electric baseboard heater*”, el cual emite calor mediante una resistencia eléctrica. Esta información es relevante debido a que los perfiles de la demanda provienen del consumo registrado por estos dispositivos durante la simulación. El edificio posee características internas que le otorga otro nivel de realismo mediante las diferentes zonas térmicas. Estas zonas térmicas están numeradas y diferenciadas en la Figura 7, por los diferentes colores que delimitan los espacios que se encuentran en interacción durante el periodo de simulación.

Figura 7. *Detalle de las zonas térmicas del edificio residencial.*



Tomado de SketchUp 2023.

La diferenciación de las zonas térmicas se aprecia por la delimitación de los colores, esta característica del modelo permite obtener resultados con un mayor nivel de detalle que son útiles para los objetivos planteados en el trabajo. Como fue mencionado con anterioridad, el bloque consta de cuatro apartamentos y dos corredores que conectan las unidades. Conformando de esta

forma un total de diez zonas, cada una de ellas con un termostato asignado. La Tabla 2 muestra en detalle las características de cada zona, dentro de estas se encuentra el nombre asignado dentro del Software y la temperatura deseada, también conocida como *setpoint*.

Tabla 2. *Caracterización de las zonas térmicas del edificio residencial.*

Zonas Térmicas.			
Numero.	Nombre	Descripción.	Temperatura (°C).
1	TZ Apartament 1	Sala del apartamento 1	18
2	TZ Apartament 2	Sala del apartamento 2	18
3	TZ Apartament 3	Sala del apartamento 3	18
4	TZ Apartament 4	Sala del apartamento 4	18
5	TZ Corridor 1	Corredor del primer piso	18
6	TZ Corridor 2	Corredor del segundo piso	18
7	TZ Room Apartament 1	Habitación del apartamento 1	20
8	TZ Room Apartament 2	Habitación del apartamento 2	20
9	TZ Room Apartament 3	Habitación del apartamento 3	20
10	TZ Room Apartament 4	Habitación del apartamento 4	20

Fuente: propia.

A continuación, se presentan con mayor detalle las configuraciones dadas al prototipo virtual mostrado. Es importante resaltar que los materiales constructivos y especificaciones se basan en las recomendaciones de la zona climática número 6 definida por ASHRAE y las normas locales relevantes según el reglamento Canadian Commission on Building and Fire Codes de 2017.

Las referencias fundamentales para establecer estas características se encuentran en la Tabla 3, que se muestra a continuación y sintetiza los materiales que conforman las superficies del edificio. En ella, se destacan las superficies exteriores e interiores, y se resaltan las propiedades del material, como el espesor y la conductividad térmica. Esta inclusión responde a la necesidad de proporcionar al software los datos esenciales para comprender el rendimiento térmico de las superficies y su capacidad para aislar el calor.

Tabla 3. *Caracterización de las zonas térmicas del edificio residencial.*

Materiales y especificaciones.			
Superficie	Tipo	Espesor (mm)	Conductividad (W/m*K)
Materiales de las superficies exteriores.			
Muros	Estuco	25.3	1.111
	Concreto	203.3	0.25
	Poliestireno expandido	100	0.0285
	Paneles de yeso	6.5	0.1538
Techo	Concreto	101.6	0.25
	Poliestireno expandido	263	0.0286
Materiales de las superficies interiores.			
Muros	Paneles de yeso (Drywall)	13	0.16
	Paneles de yeso (Drywall)	13	0.16
	Madera	27,8	0.092
Losa	Concreto estructural	152	2.31
	Carpeta aislante	139.7	0.0357
	Poliestireno expandido	263	0.0286

Tomado de ASHRAE y Canadian Commission on Building and Fire Codes, 2017.

Esta información resulta crucial para estimar el consumo energético, ya que los espacios con mejor aislamiento demandan una menor cantidad de energía [17]. La propuesta de materiales y propiedades físicas anteriormente expuesta agrega así otro nivel de realismo al modelo. Los valores y características adoptadas en este trabajo reflejan las especificaciones promedio que generalmente se encuentran en un edificio, tal como se presentó en esta sección.

3.3 Optimización.

3.3.1 *Modelo matemático*

Entendiendo las características del modelo y los requerimientos de calefacción, se ha formulado un problema de optimización multiobjetivo que considera el escenario de múltiples zonas para el estudio del caso expuesto con mayor precisión. El modelo matemático formulado se basa en un sistema de funciones afines, cuyo comportamiento es lineal, algunas de ellas son desigualdades, lo que hace que el campo de soluciones sea el conjunto de números por debajo o encima de la curva dependiendo el caso.

La función objetivo pretende minimizar los Gastos de Capital (CAPEX), es decir, la inversión requerida en los acumuladores térmicos amortizada en el tiempo. Además, se consideran los Gastos Operativos (OPEX), que representan el costo de la operación de los acumuladores térmicos, considerando sus horarios de carga, el precio de la tarifa en cada instante y el costo de operación para cada zona térmica.

A través de este modelo matemático, es posible dimensionar las unidades descritas en la Figura 1, cuyo funcionamiento y tamaño esta dictaminado por el grupo de datos sintéticos creados, dado que cada zona térmica cuenta con requerimientos diferentes y la optimización se realizó para cada uno de los espacios.

La minimización del CAPEX se logra mediante la penalización del tamaño de cada acumulador térmico con su correspondiente el valor de inversión [kWh], optimizando así el tamaño del sistema de almacenamiento térmico (ETS) para cada zona térmica, es decir que el problema se formuló para evitar aumentar el tamaño del almacenamiento, ya que esto supone un mayor costo.

Por otro lado, la minimización del OPEX, se realiza penalizando el consumo de energía en función de las tarifas eléctricas. Esto permite optimizar el funcionamiento del ETS para cada zona

térmica, es decir que el acumulador térmico consumirá la mayor energía posible cuando el precio de la tarifa sea bajo, cargándose durante las horas fuera de pico y liberando la energía en los horarios de alta demanda. El problema de optimización formulado está sujeto al límite de carga de energía, la cantidad de energía que se puede almacenar. Teniendo en cuenta la explicación anterior, se define la función objetivo de la siguiente manera:

$$\textit{Funcion objetivo} = CAPEX + OPEX \quad (4)$$

Se realizaron una serie de suposiciones que permitieron el desarrollo del trabajo al eliminar limitaciones provenientes de los datos simulados. Estas suposiciones parten del hecho de que, durante el periodo de simulación, el sistema de calefacción propuesto es totalmente eficiente, es decir, que no hay pérdidas de calor. También se supone que los perfiles de demanda generados bajo esta consideración se pueden utilizar como el comportamiento que tendrá el acumulador térmico al descargarse, lo que significa que la demanda es equivalente a la potencia de descarga. La última suposición parte de la idea de que no puede haber momentos en que el confort térmico no se satisfaga, por lo tanto, se considera que debe mantenerse la temperatura deseada que fue definida en la Tabla 2 para cada zona térmica.

Para asegurar este confort térmico, se establece y se tiene en cuenta la capacidad del acumulador térmico de emitir calor simultáneamente mientras consume energía. A continuación, se muestra el modelo matemático planteado y la descripción de cada termino:

Minimizar Cap_k sujeto a:

$$\alpha \cdot \sum_{k=1}^N Cap_k + \sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T C_t P_{k,t}^{ch} \Delta t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{k,t}^{ch} \leq Cap_k \cdot \gamma \quad (6)$$

$$0 \leq ES_{k,t} \leq Cap_k \quad (7)$$

$$P_{k,t}^{dis} = d_{k,t} \quad (8)$$

$$ES_{k,t+1} = ES_{k,t} + P_{k,t}^{ch} - P_{k,t}^{dis} \quad (9)$$

Del sistema anterior se puede apreciar la Ecuación 5, definida como la función objetivo, seguida de sus restricciones. En dicha función, C_t es el precio de la energía en el instante t considerando la tarifa dinámica D-flex de Hydroquebec [¢/kWh], P_{ch} es la potencia consumida para cargar el dispositivo de la zona k en el instante t [kW], P_{dis} es la potencia descargada por el acumulador de la zona k en el instante t [kW], ES corresponde a la energía almacenada por el equipo de la zona k [kWh], Cap_k es la capacidad nominal de este para la zona k [kWh]. Por último, d_k es la demanda de energía (según la demanda proveniente de la simulación) de la zona k en el instante t [kW].

Por otro lado, α es el precio asumido por kWh de un almacenador térmico [¢/kWh]. Este valor se basó en la información proporcionada por el fabricante *STEEFES*, tomando como referencia el modelo *room unit 2102*. Para dicho factor se consideró la inversión de \$2135 CAD, que corresponde al precio de instalación del sistema. La aproximación se realizó calculando la relación entre el valor de la inversión y la energía liberada durante el tiempo de servicio, el cual se

estableció en 10 años tomando como referencia la garantía del fabricante. Para estimar la energía liberada se multiplico la potencia de la referencia utilizada (3 kW) por el número total de horas, obteniendo de esta forma la tasa representativa del precio por hora del dispositivo [18].

$$\alpha [\text{¢/kWh}] = \frac{\text{Inversion} [\text{¢}]}{\text{Potencia} [\text{kW}] \cdot \text{Periodo de servicio} [\text{h}]} \quad (10)$$

Por último, γ es el valor proporcional con el cual se puede cargar un acumulador termico basado en su capacidad nominal, es la relación que determina la capacidad de energía que puede ser almacenada sin sobrepasar su capacidad. Dicho factor también se estimó a través de los productos de *STEEFES* tomando como referencia el modelo *room unit 2102*.

Nótese que la Ecuación 8 es una suposición debido a que se asume que la demanda es igual a la potencia de descarga. Así mismo, la Ecuación 9 corresponde a la ecuación de estado de carga, la cual determina la cantidad de energía almacenada en el dispositivo en cada periodo.

Dada la naturaleza de problema, se puede entender como un clásico modelo de problema lineal, que puede ser resuelto a través de la optimización debido a la convexidad de la función y sus restricciones afines. El conjunto de soluciones se establece dentro de la convergencia de varias rectas, que forman un polipéptido que permite encontrar un valor óptimo para un entorno de condiciones otorgadas. Lo anterior se justifica desde, donde se afirma que todo problema lineal puede ser convexo. “*Los problemas de programación lineal (PL) tienen propiedades geométricas y algébricas que permiten garantizar el óptimo global. El espacio de soluciones asociado a un problema lineal es un politopo en donde el óptimo se encuentra en alguno de sus vértices*” [8].

3.3.2 Solucionador a través de Phyton.

Permite obtener soluciones para problemas de optimización mediante la simple especificación de parámetros y la definición de ecuaciones del modelo matemático. Este enfoque se aplicó en el presente estudio, donde se llevó a cabo la simulación de un problema de optimización utilizando el lenguaje de programación Python y la librería CVXPY. Durante esta simulación, se proporcionaron soluciones para cada instante de tiempo ($t=k+1$), lo que equivale a cada hora dentro del periodo total de la simulación. En este estudio, se considera el Rate Flex D de Hydro-Québec [3], donde la tarifa aumenta a 53.52 ¢/kWh durante el pico de demanda invernal, y en los periodos de demanda fuera de pico se mantiene en 4.58 ¢/kWh, siendo los periodos de pico invernales de 6 a 9 a.m. y de 4 a 8 p.m. A continuación, se presentará una representación visual del programa para ilustrar de forma general el solucionador.

Figura 8. Representación visual de la programación en Phyton.

```
def intento1(d,c,timeSteps,flag1): # this function is for just one zone;
    Pc = cvx.Variable(timeSteps,name='powerOfCharging') # ETS charging power
    ES = cvx.Variable(timeSteps+1,integer=True,name='energyStored') # ETS Energy stored
    Pd = cvx.Variable(timeSteps,name='powerOfDischarging') # ETS discharging power
    Pt = cvx.Variable(timeSteps,name='auxiliar') # auxiliar variable, for see the balance between charging and discharging
    Cap = cvx.Variable(name='installedCapacity') # ETS nominal capacity
    cost = 0 # Initializing cost function
    # 'res' stands for constraint
    res = [ES[timeSteps]==0] # Initializing constraints, final energy stored
    res += [0 <= Cap] # ETS nominal capacity cannot be less than zero
    for t in range(timeSteps):
        res += [ES[0]==0] # Initial energy stored
        cost = cost + c[t]*Pc[t] # cost is the price of energy
        res += [0 <= ES[t], ES[t] <= Cap] # limits of the energy stored
        res += [0 <= Pc[t]] # charging power cannot be less than zero
        res += [0 <= Pd[t]] # discharging power cannot be less than zero
        res += [Pt[t] == Pc[t] - Pd[t]]
        res += [round(d[t]) == Pd[t]] # the discharging power has to satisfy the demand
        res += [ES[t+1] == ES[t] + Pt[t]]
    obj = cvx.Minimize(cost)
    Precio = cvx.Problem(obj, res)
    Precio.solve(solver=cvx.CVXOPT)
```

Tomado de Phyton.

Como se evidencia en la Figura 8, se refleja el cuerpo del programa diseñado para resolver el modelo matemático planteado. Se observa la definición de las variables para el modelo matemático, también se establecen las ecuaciones y parámetros. Además, se aprecia la creación de un vector que permite almacenar los resultados de la optimización.

Los resultados esperados consisten en la minimización de la variable **Cap** en la Ecuación 5, es decir, se busca obtener la capacidad mínima para satisfacer la demanda máxima de energía durante todas las horas del periodo de simulación en todas las zonas térmicas. Asimismo, la minimización se realiza en función al costo, penalizando la carga del acumulador ante una tarifa elevada, es decir cuando usualmente son los picos de demanda. Por esta razón, los resultados de cada instante t permiten entender la operación del acumulador, ya que se obtiene el precio de la energía y el estado de carga, a través de la ecuación 9, La cual gobierna este fenómeno.

4. Resultados

Esta sección presenta los resultados de la optimización con respecto al dimensionamiento y operaciones de los Sistemas de Almacenamiento de energía térmica. Estos resultados fueron obtenidos mediante el uso de la Ecuación 5 y 9 para simulaciones utilizando el algoritmo de optimización convexa y el conjunto de datos sintéticos generados para la demanda en el periodo invernal de un bloque de apartamentos típico contextualizado en Quebec.

4.1 Simulación

El primer resultado tangible de este trabajo es el prototipo final del edificio planteado, cuyas características y comportamiento obedecen a los presentados en la sección 3.2.2. Caso de estudio. Este prototipo permitió obtener los datos sintéticos de la demanda energética para el invierno de 2022. Sin embargo, este estudio analizo los periodos más críticos para realizar los respectivos

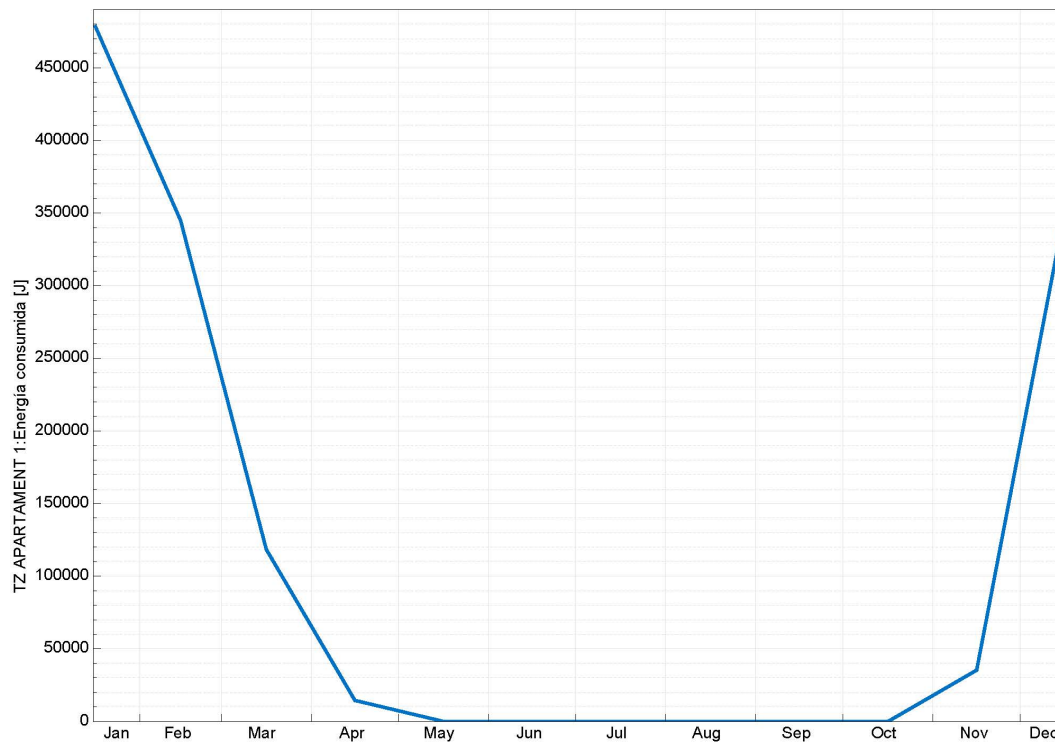
análisis referentes lo anterior con busca de poder sintetizar las gráficas y evidenciar de manera clara el comportamiento del sistema con respecto a la demanda.

4.1.1 Perfiles de la demanda

Para llevar a cabo el análisis, se consideró un edificio de apartamentos residenciales con datos de consumo de energía para calefacción generados por el uso de “*electric baseboard heaters*”. Ante los desafíos en la adquisición de datos reales, el uso de datos sintéticos resulto una alternativa bastante efectiva.

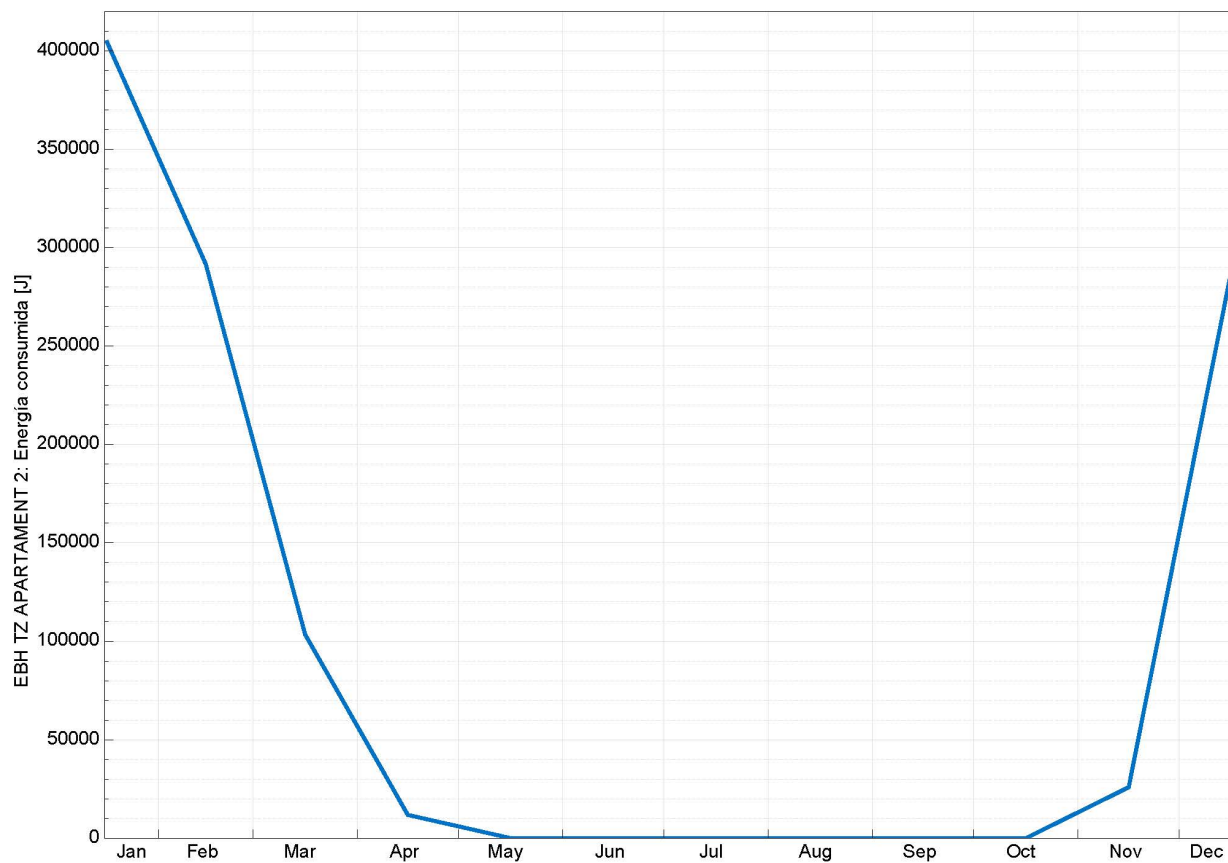
Una vez finalizada la creación del prototipo virtual, la obtención de datos implicó configurar el periodo de simulación y delegar la responsabilidad sobre la simulación al software OpenStudio. La principal variable extraída del software fue la energía usada por el sistema de calefacción cada hora para alcanzar la temperatura deseada, en cada zona térmica y como se estipula en la sección 3.2.2. Dicha variable es la energía consumida, en el contexto de este trabajo se requiere exclusivamente a la energía destinada a la calefacción de espacios.

A continuación, se mostrará la gráfica de los resultados referentes a la simulación, los perfiles de demanda que se expondrán corresponden al consumo de energía promedio mensual, cada grafica representa una zona térmica.

Figura 9. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 1.*

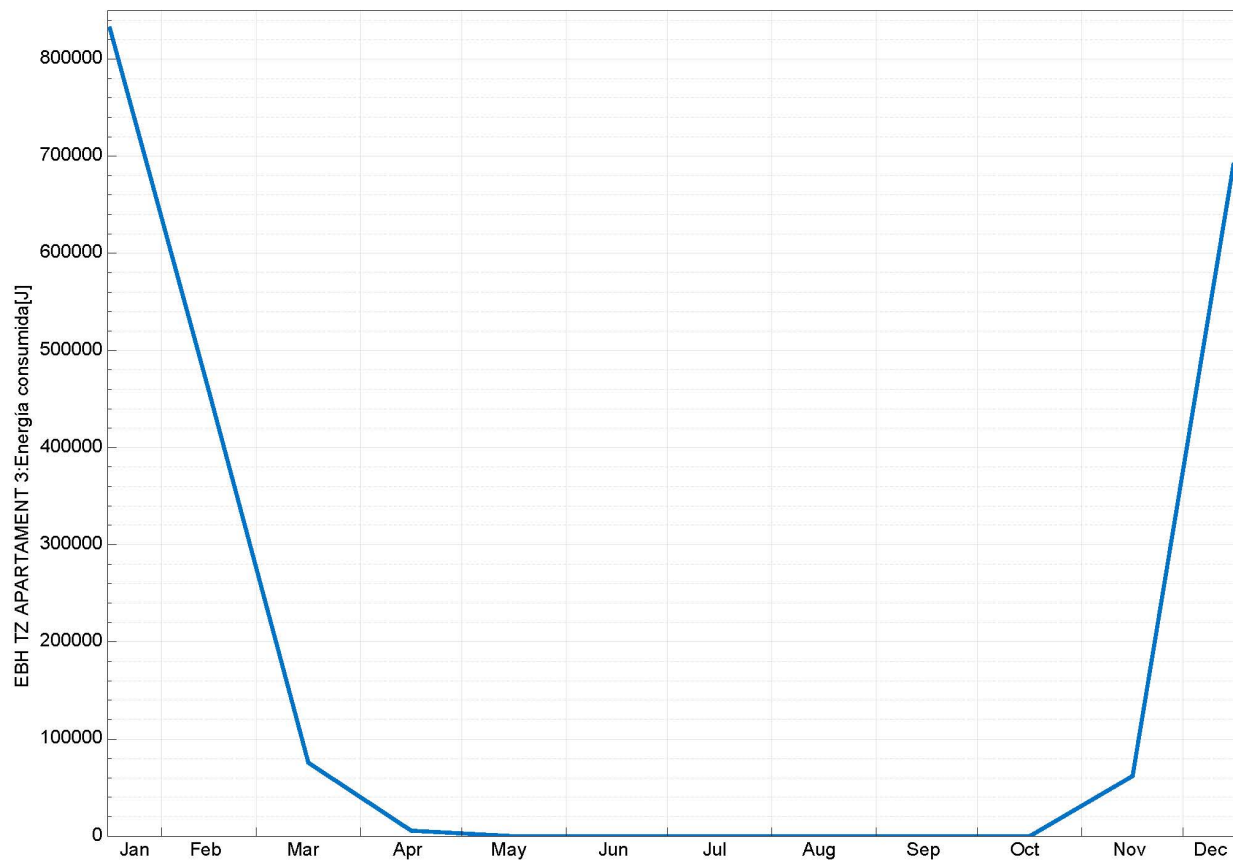
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 1 correspondiente a la denominada sala de estar del primer apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 2, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 10. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 2.*

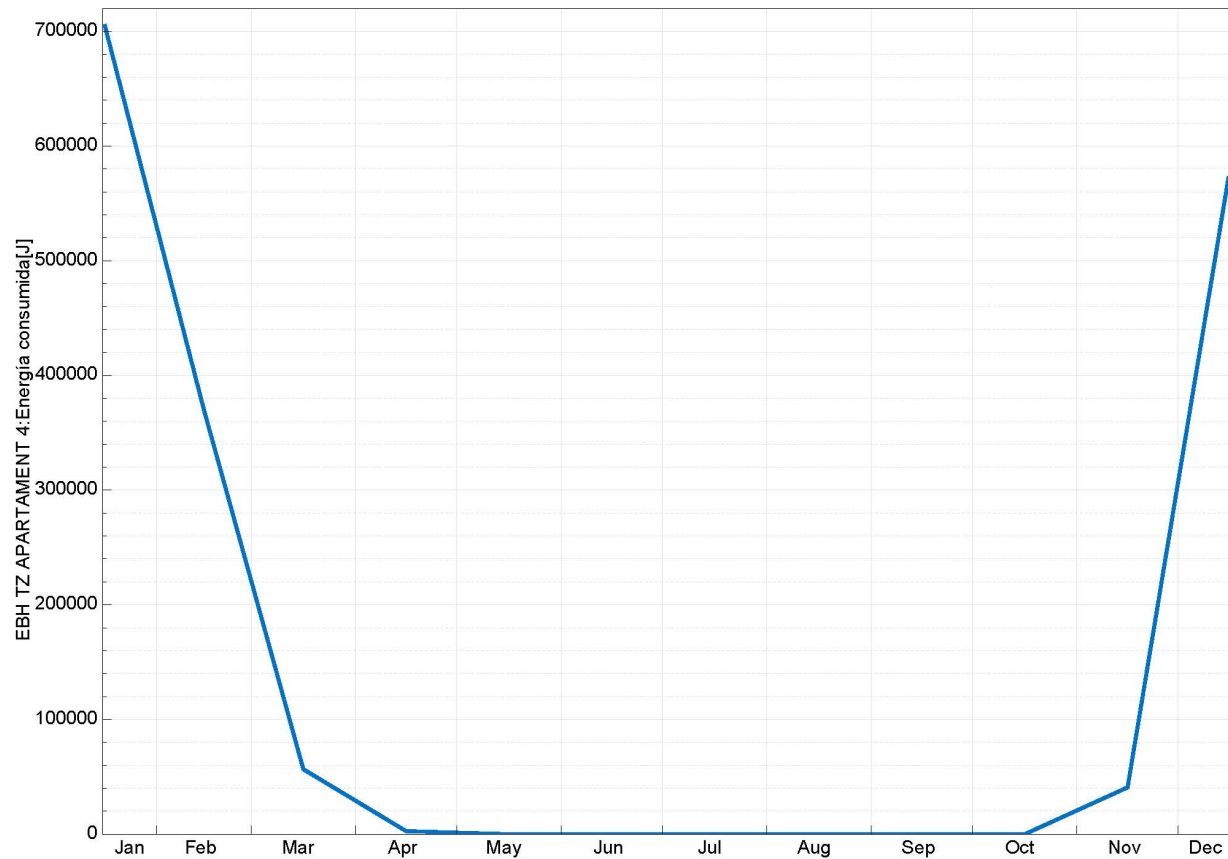
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 2 correspondiente a la denominada sala de estar del segundo apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 3, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 11. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 3.*

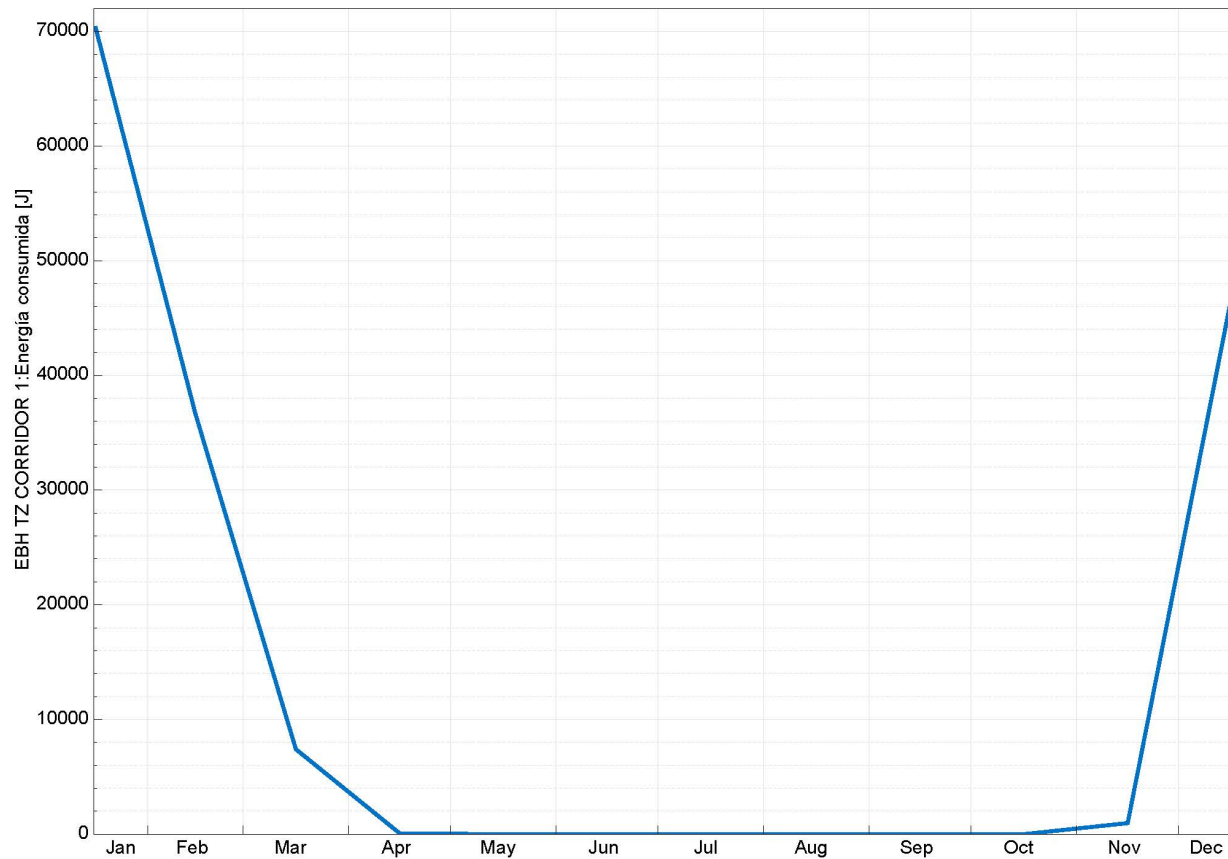
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 3 correspondiente a la denominada sala de estar del tercer apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 4, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 12. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 4.*

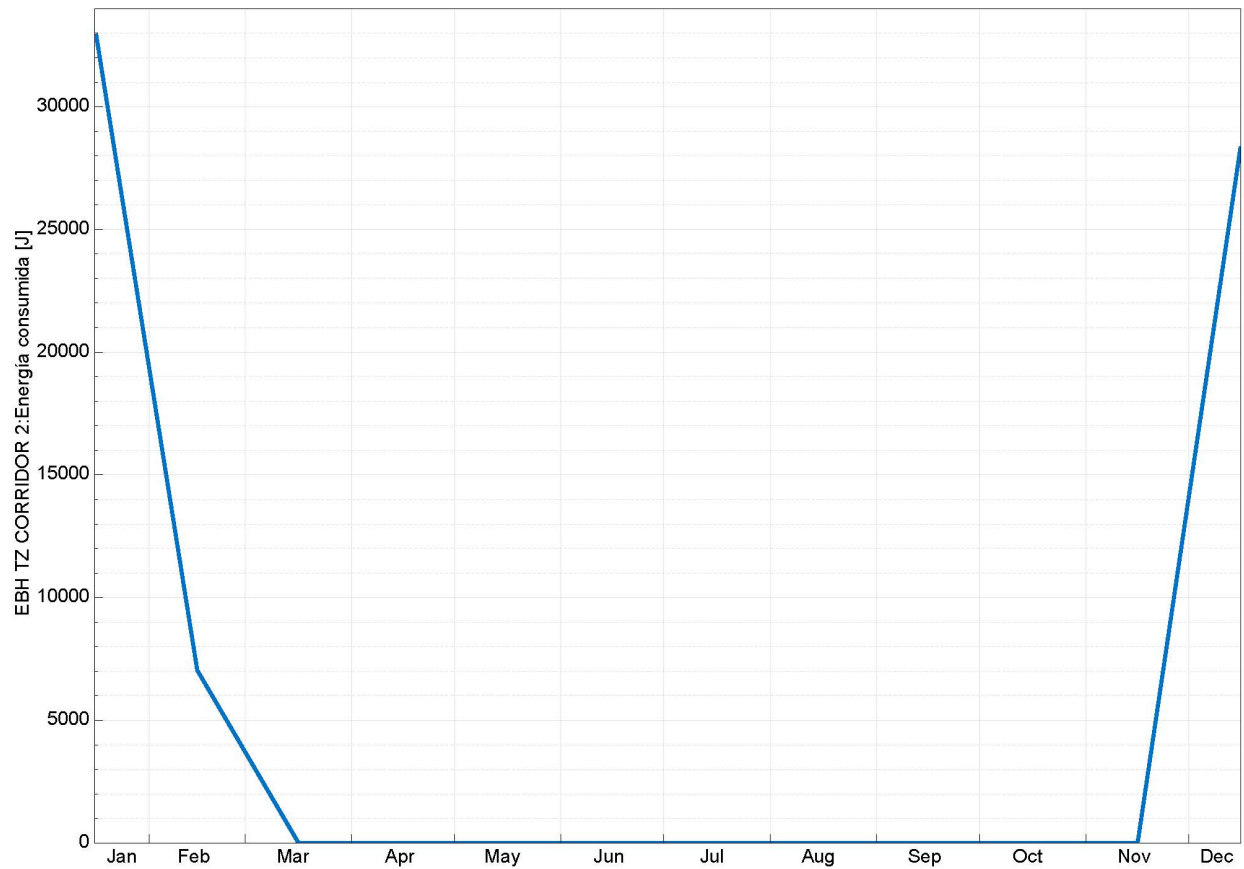
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 4 correspondiente a la denominada sala de estar del cuarto apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 5, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 13. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 5.*

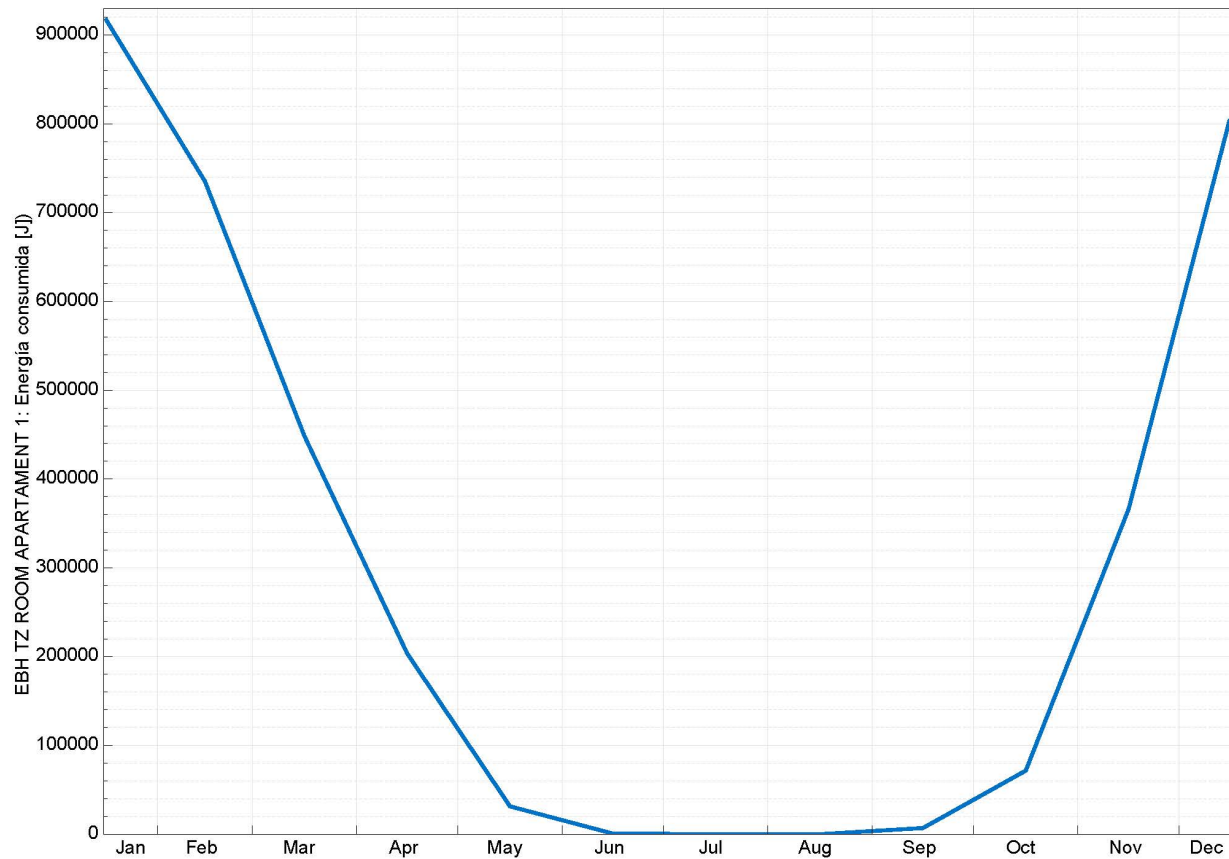
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 5 correspondiente al corredor que existe entre los apartamentos del primer piso. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 6, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 14. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 6.*

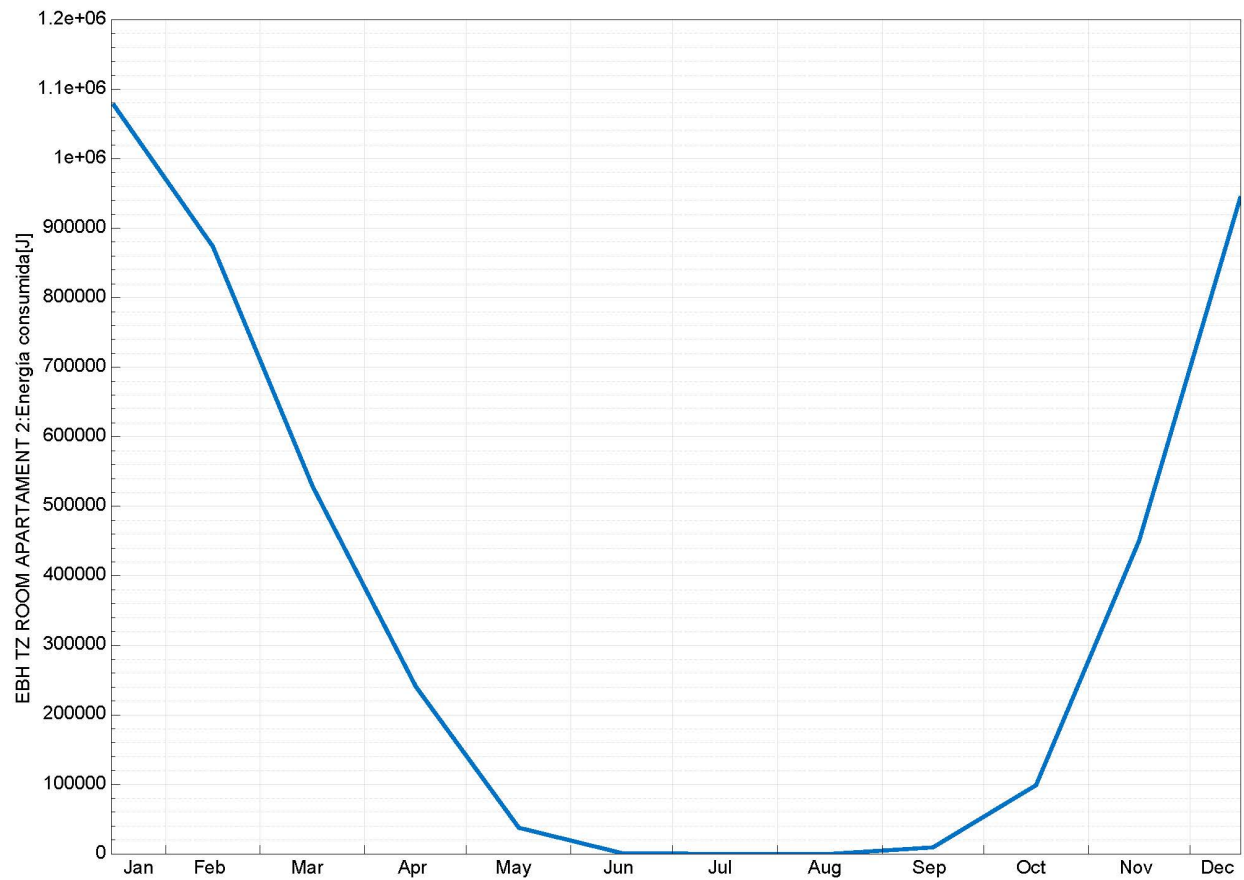
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 6 correspondiente al corredor que existe entre los apartamentos del segundo piso. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 7, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 15. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 7.*

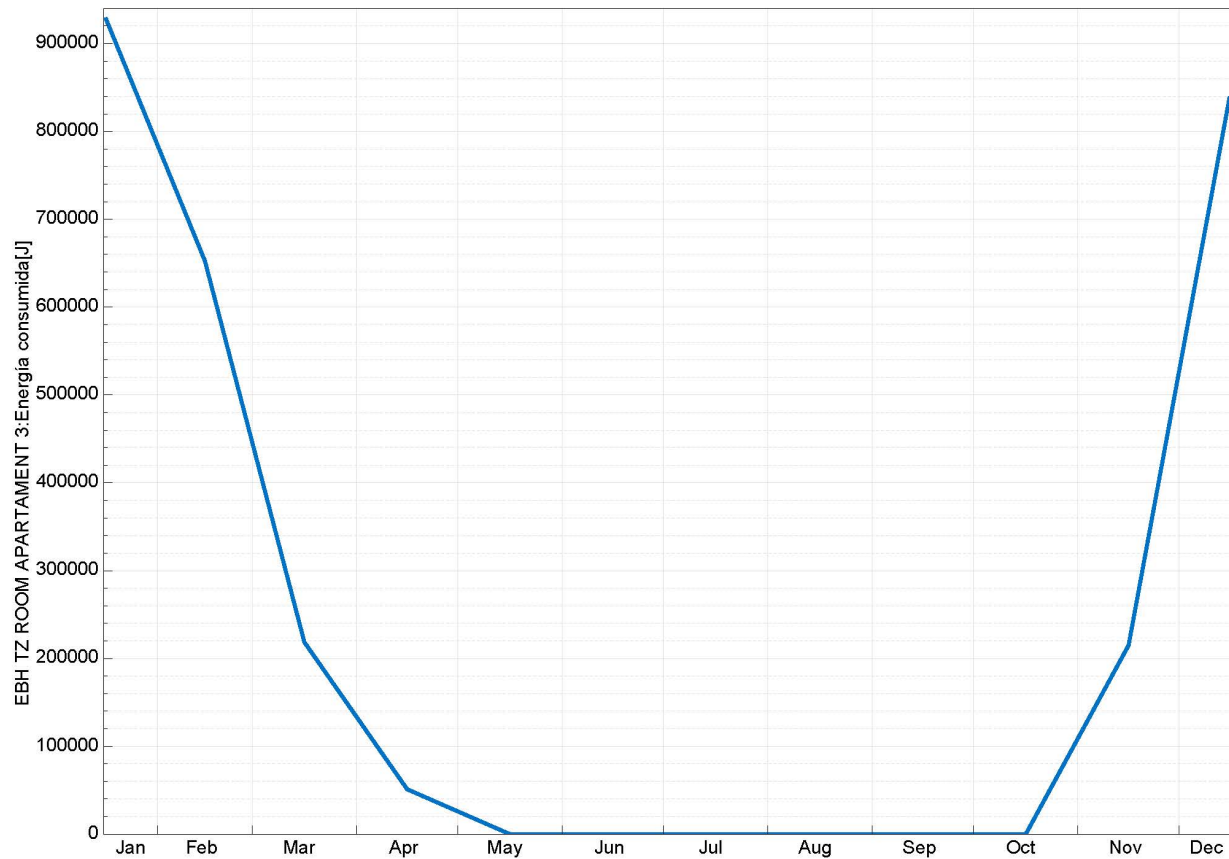
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 7 correspondiente la habitación principal situada en el primer apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 8, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 16. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 8.*

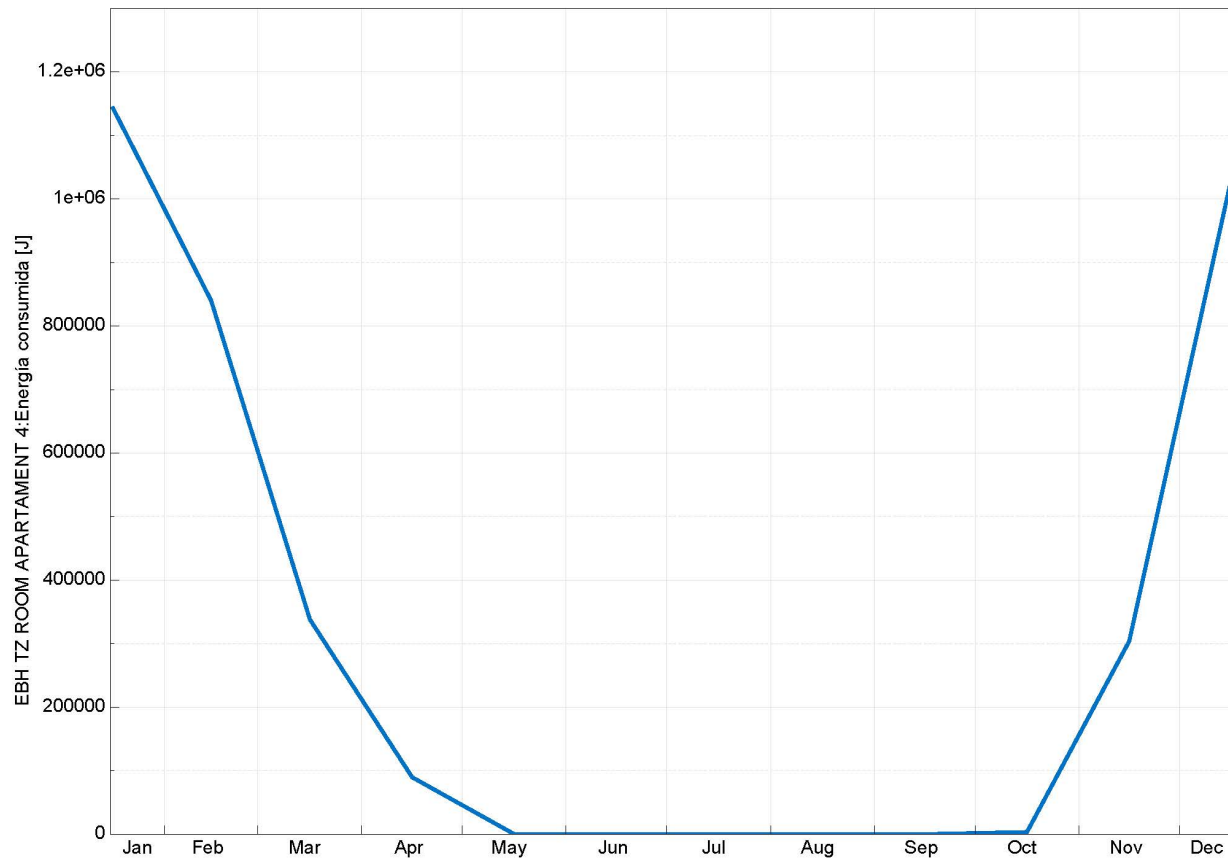
Tomado de Dview.

La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 8 correspondiente la habitación principal situada en el segundo apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 9, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 17. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 9.*

Tomado de Dview.

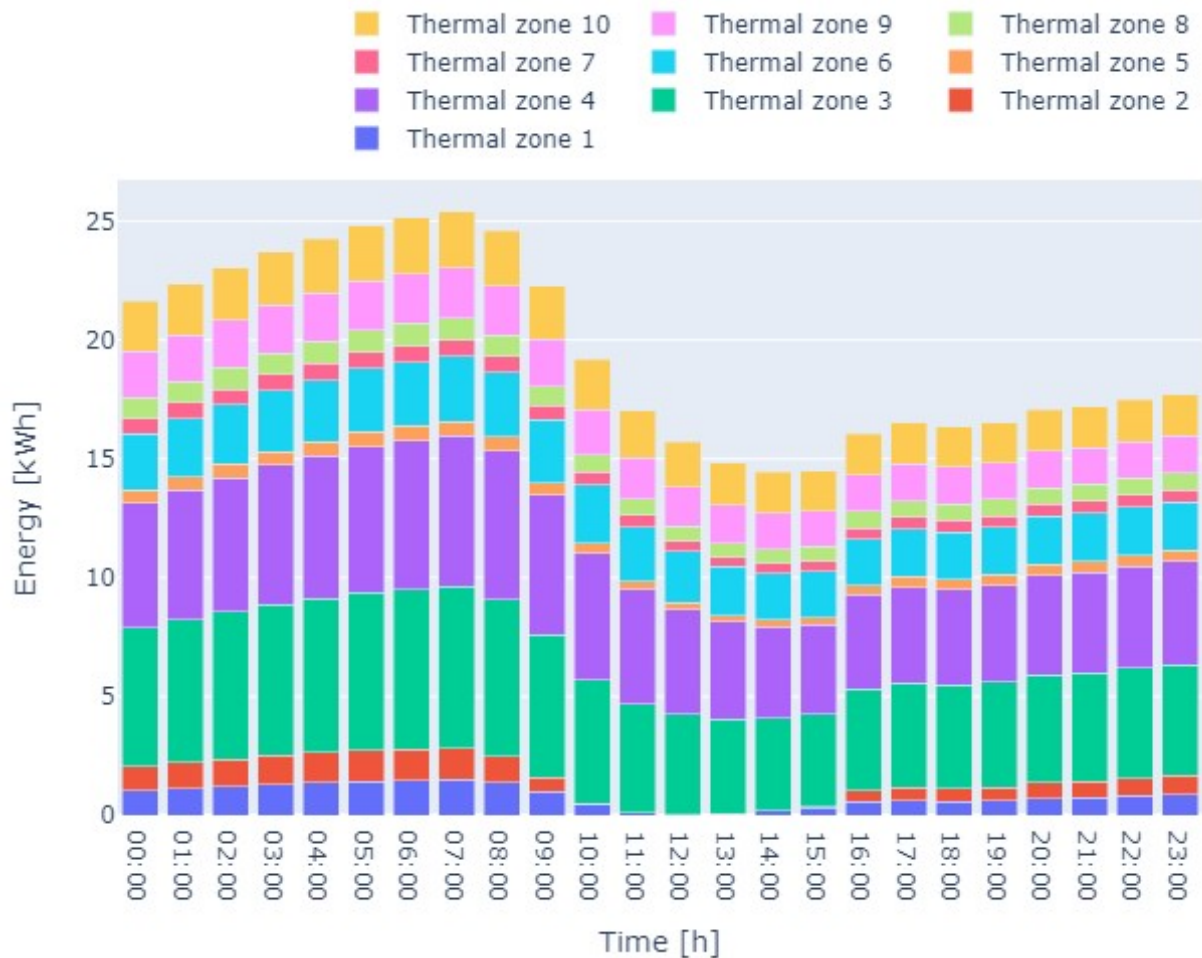
La anterior gráfica, muestra el perfil de la demanda promedio de la zona térmica 9 correspondiente la habitación principal situada en el tercer apartamento. En seguida, se encuentra la gráfica del perfil de la demanda de la zona térmica 10, representando la demanda promedio mensual durante el año 2022.

Figura 18. *Perfil de la demanda promedio – Zona Térmica 10.*

Tomado de Dview.

Las figuras anteriores muestran los perfiles de demanda de las diferentes zonas térmicas a lo largo del periodo de simulación, las unidades mediante la cuales se expresa son Joules. Es evidente que en cuenta que cada zona térmica se tiene un comportamiento de consumo diferente debido a las distintas características térmicas causadas por diversas circunstancias (ubicación en el edificio, interacciones térmicas, orientación, exposición al clima, etc).

La siguiente imagen muestra 24 durante el día más crítico del invierno de 2022, esta imagen tiene el fin de ilustrar de manera más sintetizada y a una menor escala el comportamiento de la demanda en las diferentes zonas térmicas.

Figura 19. Comportamiento de la demanda térmica durante el invierno.

Tomado de Phytion.

La grafica anterior muestra el comportamiento de la demanda térmica, expresada en kilovatios por hora (kWh), en las diferentes zonas térmicas durante el periodo crítico del invierno. Entendiendo que los colores representan diferentes zonas térmicas, como indica la leyenda, se observa que las zonas localizadas en el segundo piso, como las zonas térmicas 9 o 10, son las que presentan una mayor demanda. Esto se debe a su mayor exposición a las condiciones climáticas, en comparación con las del primer piso. Estas últimas se encuentran respaldadas por las capas de

materiales que tienen sobre ellas y el calor migrante de las otras zonas térmicas, lo que hace que sea más fácil conservar el calor y, por lo tanto, se requiera menos energía. Las zonas de menor demanda son las denominadas “salas de estar” de los apartamentos 1 y 2, esto debido a que no son tan demandantes como otros espacios del edificio.

4.2 Optimización

Tras la simulación, una vez obtenida la data sintética, fueron cargados los datos provenientes del software al código de Phyton. Esto permite configurar la optimización para cada zona ya que la data venia organizada de manera que cada columna representara una zona térmica. Una vez realizado el proceso de optimización multi-zona, se obtuvieron los resultados de la capacidad optima y la minimización del costo en cada instante del periodo de simulación.

A continuación, se presenta la tabla de dimensionamiento, donde se especifica la capacidad óptima de almacenamiento del acumulador térmico. Es fundamental destacar que los resultados obtenidos reflejan los requisitos mínimos de almacenamiento energético para cada zona térmica. Esto implica la instalación de un acumulador térmico con la capacidad mencionada para garantizar un funcionamiento óptimo, dentro de los parámetros y restricciones definidas en la metodología.

Tabla 4. *Dimensionamiento final de capacidad optima de almacenamiento.*

Dimensionamiento final			
Numero.	Nombre	Descripción.	Capacidad óptima de almacenamiento(kWh)
1	TZ Apartament 1	Sala del apartamento 1	3.73
2	TZ Apartament 2	Sala del apartamento 2	3.31
3	TZ Apartament 3	Sala del apartamento 3	21.4
4	TZ Apartament 4	Sala del apartamento 4	20
5	TZ Corridor 1	Corredor del primer piso	2
6	TZ Corridor 2	Corredor del segundo piso	9.51
7	TZ Room Apartament 1	Habitación del apartamento 1	2.38
8	TZ Room Apartament 2	Habitación del apartamento 2	3.34
9	TZ Room Apartament 3	Habitación del apartamento 3	7.42
10	TZ Room Apartament 4	Habitación del apartamento 4	8.33

Fuente: propia.

La anterior tabla plasma los resultados sobre la capacidad optima de almacenamiento, tras realizar la optimización. La capacidad optima de almacenamiento fue dimensionada para satisfacer la hora más crítica en materia de demanda térmica, durante el periodo para el cual se realizó la simulación. En la tabla se muestra la zona térmica y su respectiva capacidad optima requerida para alcanzar el confort térmico a través de un sistema un acumulador térmico por zonas.

El análisis multi-zona revela diferentes fenómenos que resultan relevantes para comprender los factores que influyen en la demanda térmica del edificio. En particular, las primeras tres zonas térmicas presentadas en la Tabla 4, ofrecen un escenario para comprender los factores implícitos que influyen en el consumo energético; a pesar de que las tres zonas comparten características arquitectónicas similares en cuanto a geometría, tamaño y materiales, existen atenuantes que contribuyen a la variación en sus requisitos de energía. Ejemplo de ello es la orientación y exposición de la zona térmica a las condiciones climáticas. En este caso, como se evidencia incluso si comparten características arquitectónicas similares, presentan diferentes requerimientos, lo que

hace imperativo el análisis de múltiples zonas, al momento de realizar el dimensionamiento de sistemas de acumuladores térmicos.

Las zonas 3 y 4 resultan en una mayor pérdida de calor en comparación con la zona térmica 1, ya que al ubicarse en la parte superior del edificio hace que los materiales tengan que lidiar directamente con los efectos de las condiciones climáticas, requiriendo una mayor demanda de los materiales para aislar el calor. Factores como el ángulo de incidencia de la luz solar y los patrones de viento pueden influir en la dinámica térmica de cada zona de manera diferente.

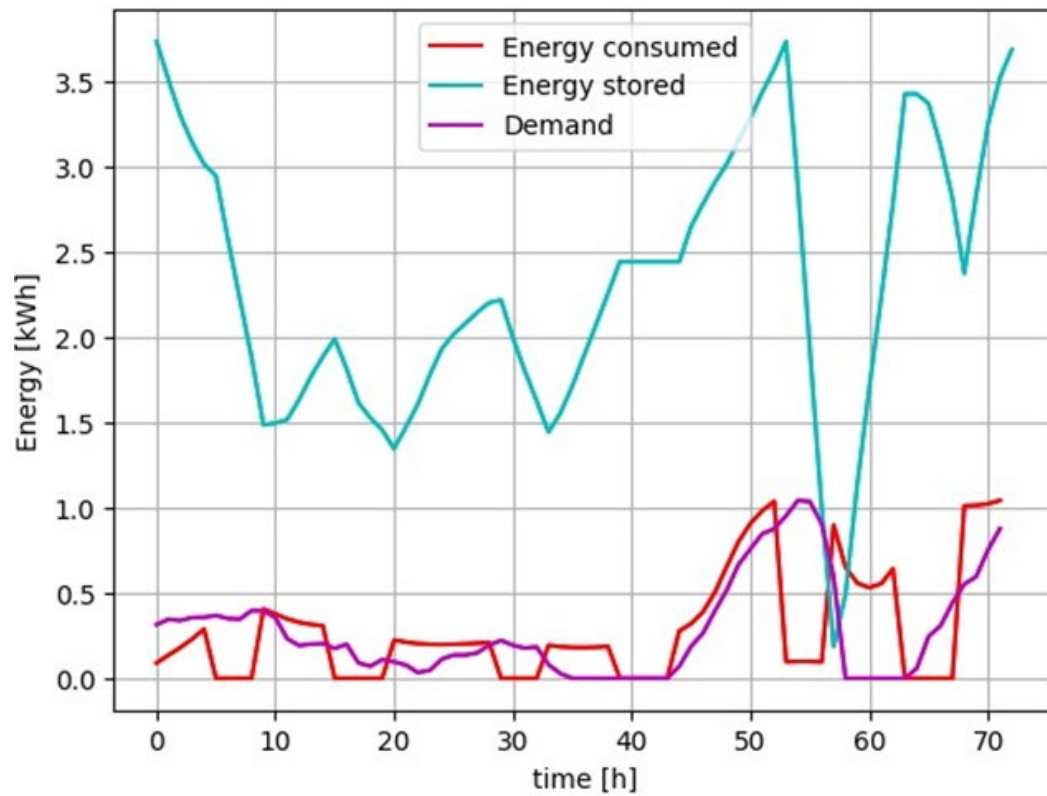
Del mismo modo, cuando se observa la zona térmica de los corredores, se aprecia que estas muestran diferentes cantidades de demanda energética, debido al respectivo nivel de exposición a las condiciones climáticas. Por ejemplo, el corredor del segundo piso es más susceptible a la pérdida de calor debido a su posición elevada y mayor exposición a los elementos externos. Si bien las zonas térmicas y los corredores pueden compartir atributos arquitectónicos comunes, variaciones sutiles en la exposición ambiental y consideraciones de diseño pueden resultar en diferencias abruptas en sus requisitos de energía. Comprender estos matices es crucial para optimizar las estrategias de calefacción y mejorar la eficiencia energética general dentro del edificio. Así mismo, esto es una motivación relevante para realizar un análisis de múltiples zonas.

Por otro lado, es importante destacar que las zonas térmicas asignadas a las habitaciones principales de los apartamentos (zonas térmicas de la 7 a la 10), presentan una demanda energética menor en comparación con el resto del edificio. Este fenómeno se atribuye a las características arquitectónicas específicas de estas áreas, que poseen un área reducida, siendo un factor determinante en la demanda térmica de un espacio [19]. Esta condición conduce a una mayor concentración de calor y a una disipación más lenta del mismo, debido a una mayor inercia térmica. Es importante señalar que esta inercia térmica persiste a pesar de que los materiales utilizados en la construcción del edificio sean uniformes.

Entre los hallazgos particulares de este estudio, se destaca claramente la influencia significativa que ha tenido la arquitectura en el perfil de la demanda. Este impacto es especialmente notable en las habitaciones, donde los requisitos de confort térmico son más exigentes. Específicamente, se ha establecido un nivel de confort térmico de 20 grados Celsius, lo cual representa dos grados más alto que el estándar aplicado al resto de las zonas, como se detalla en la Tabla 2.

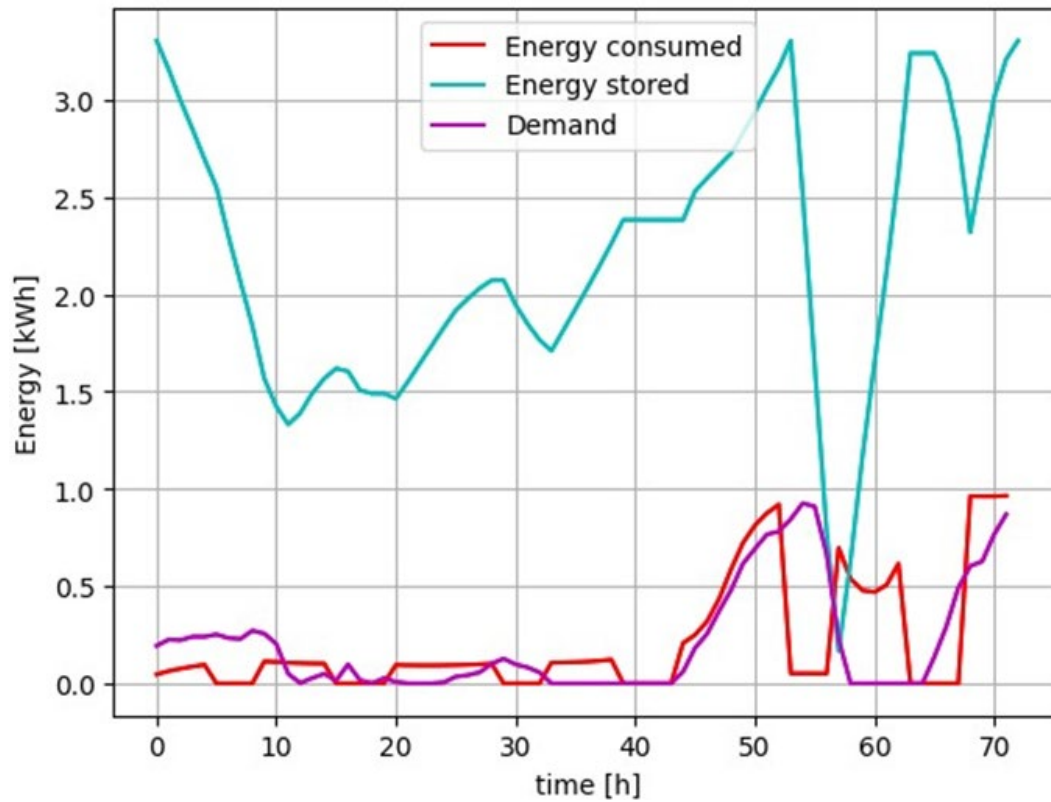
A continuación, se presentará una perspectiva detallada del funcionamiento del acumulador térmico en cada zona térmica, enfocándose en un análisis específico para las zonas térmicas con un escenario más crítico. Las siguientes graficas ilustran la operación y carga optima durante el periodo más crítico del tiempo analizado, siendo tres días del mes de enero (01/02/2022-05/02/2022). Es importante destacar que, aunque los datos se generaron durante los meses de invierno del año 2022, las siguientes imágenes abarcan un intervalo de horas definido como aquel que representa un escenario de alta exigencia para el sistema. Esto permite el análisis y la síntesis del conjunto de datos previamente generados. Se observa que todas las zonas cumplen con su capacidad óptima individual de almacenamiento térmico eléctrico y satisfacen su demanda energética.

A continuación, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 1 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ *Apartament 1*” Asignada al espacio de la sala de estar del apartamento número 1.

Figura 20. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 1.

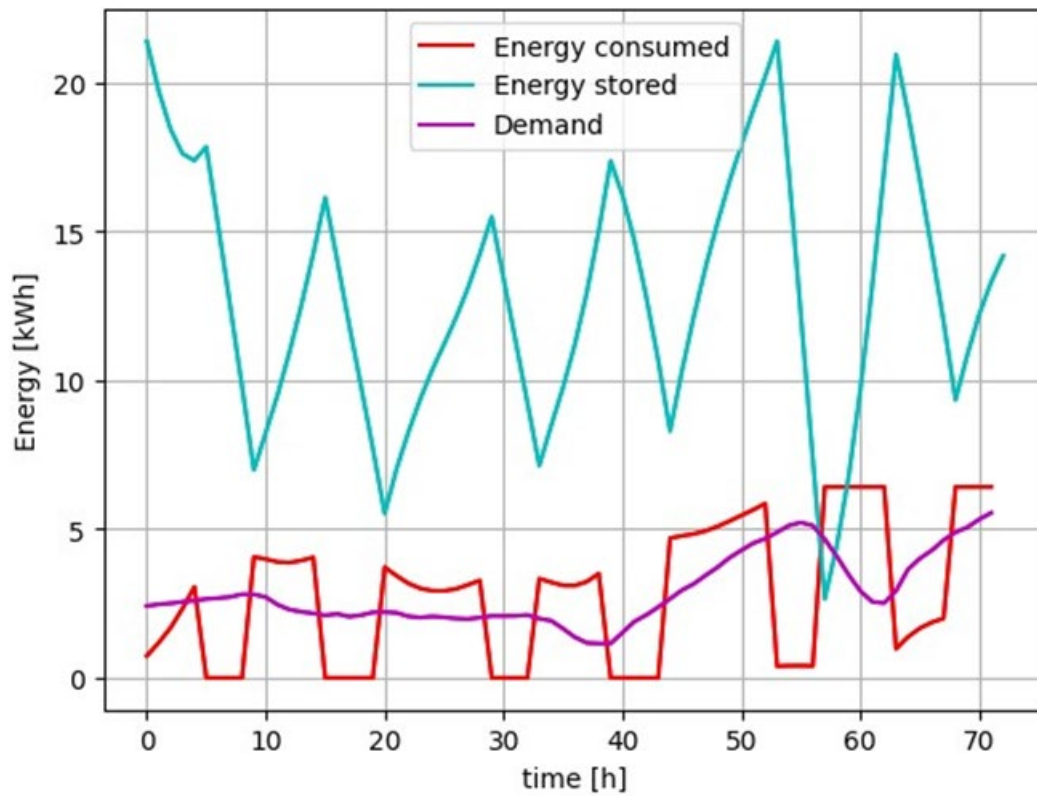
Tomado de Phyton.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 2 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Apartament 2” Asignada al espacio de la sala de estar del apartamento número 2.

Figura 21. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 2.

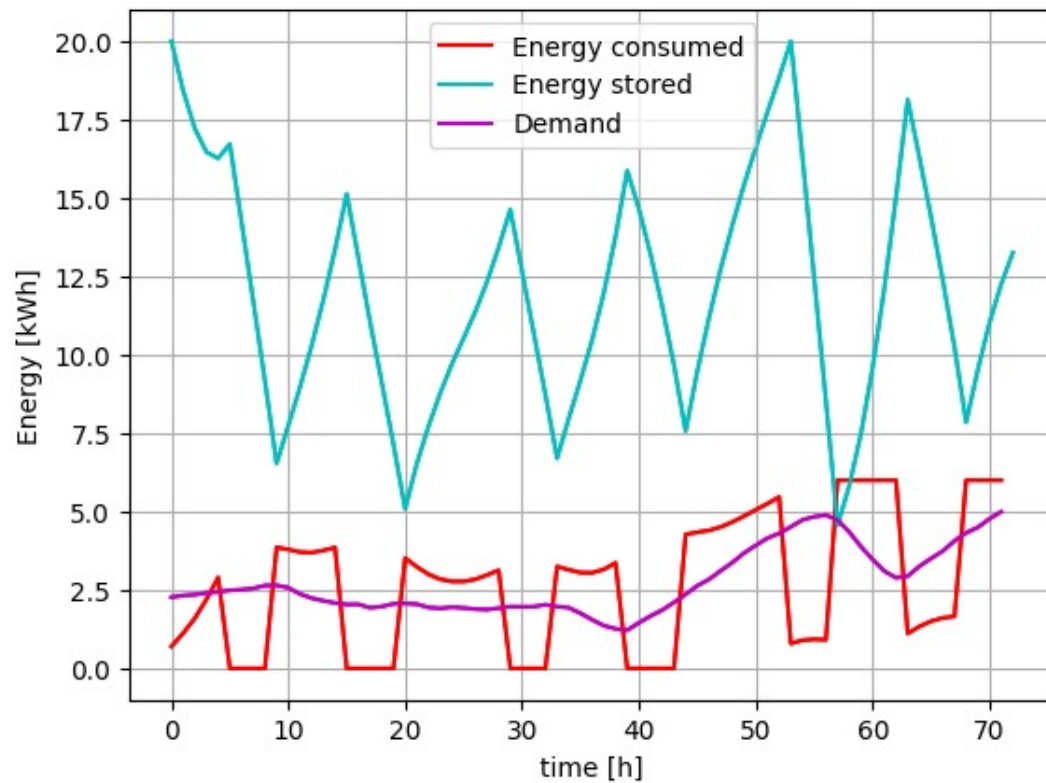
Tomado de Phytton.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 3 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Apartament 3” Asignada al espacio de la sala de estar del apartamento número 3.

Figura 22. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 3.

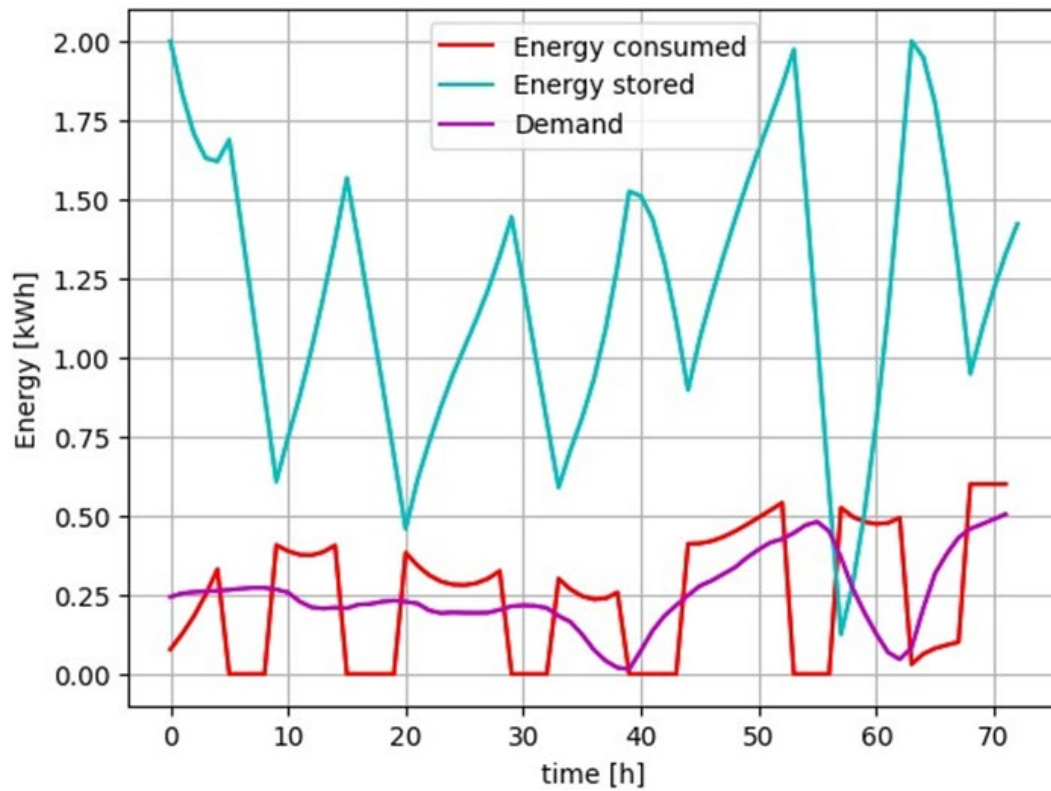
Tomado de Phytion.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 4 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Apartament 4” Asignada al espacio de la sala de estar del apartamento número 4.

Figura 23. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 4.

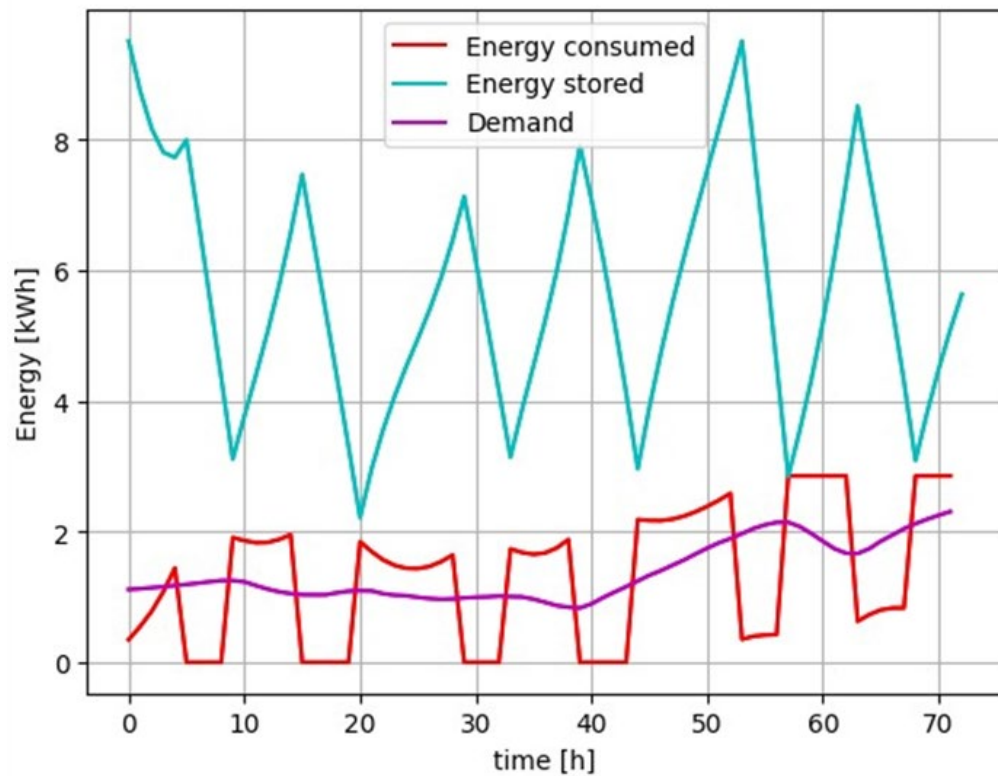
Tomado de Phytón.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 5 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Corridor 1” Asignada al espacio del corredor localizado entre los apartamentos del primer piso.

Figura 24. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 5.

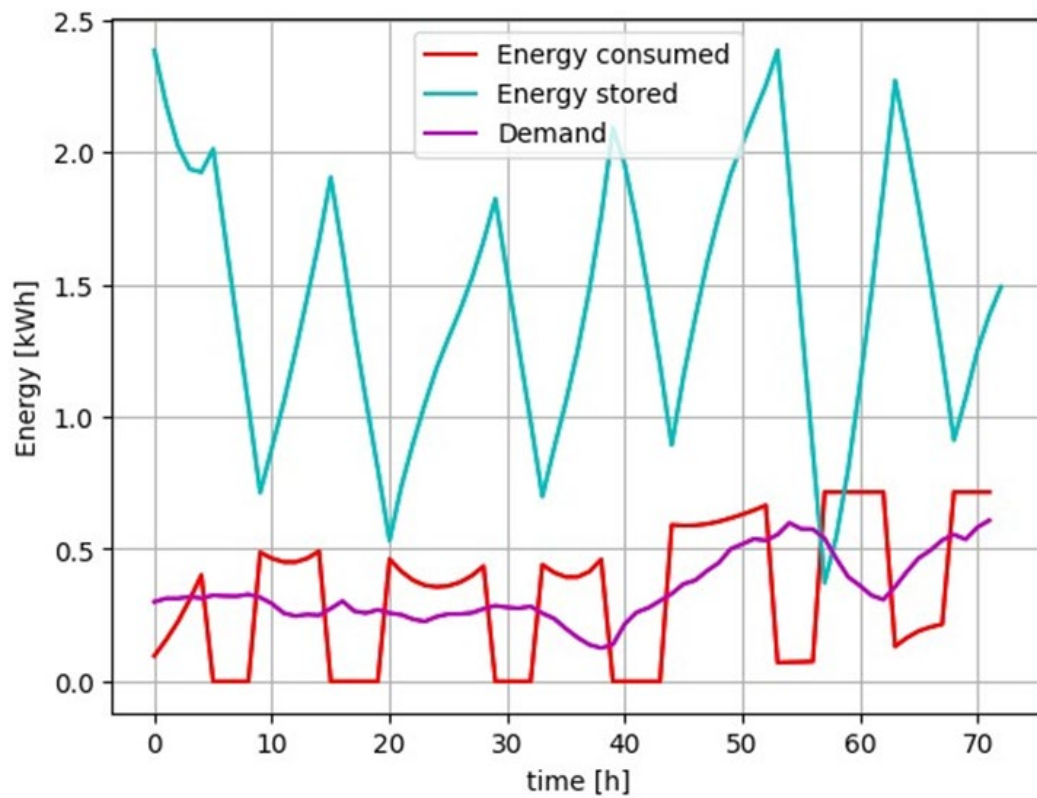
Tomado de Phyton.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 6 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Corridor 2” Asignada al espacio del corredor localizado entre los apartamentos del segundo piso.

Figura 25. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 6.

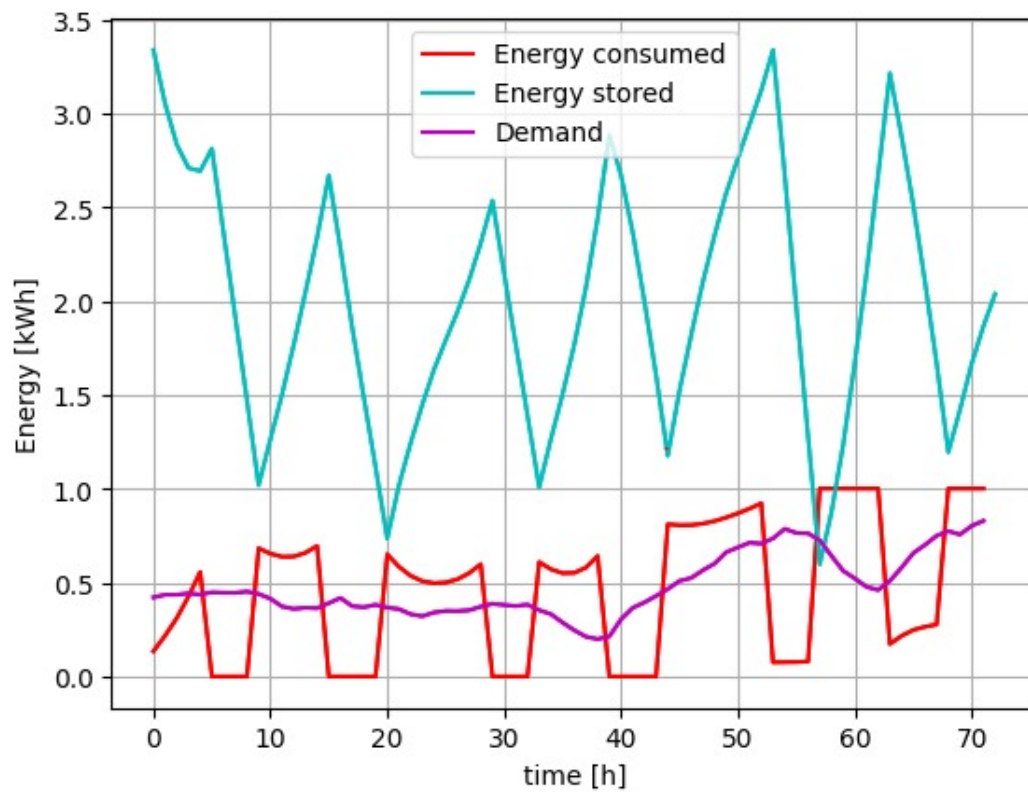
Tomado de Phytion.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 7 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Room Apartament 1” Asignada al espacio de la habitación principal del apartamento 1.

Figura 26. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 7.

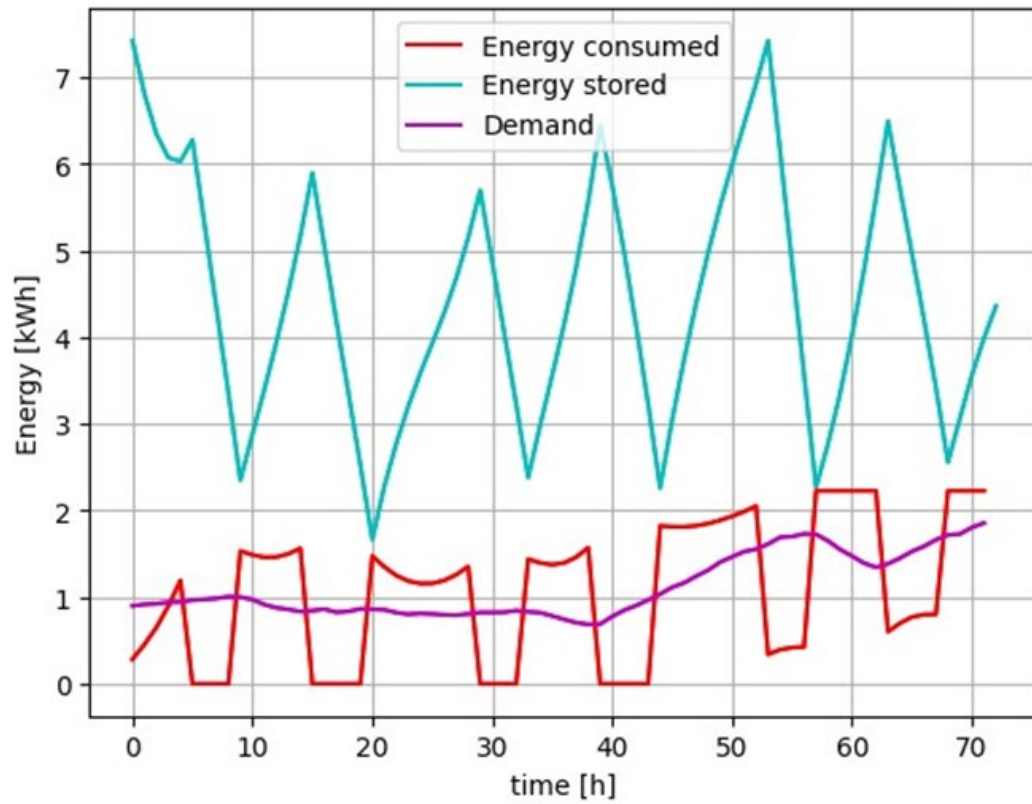
Tomado de Phytion.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 8 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Room Apartament 2” Asignada al espacio de la habitación principal del apartamento 2.

Figura 27. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 8.

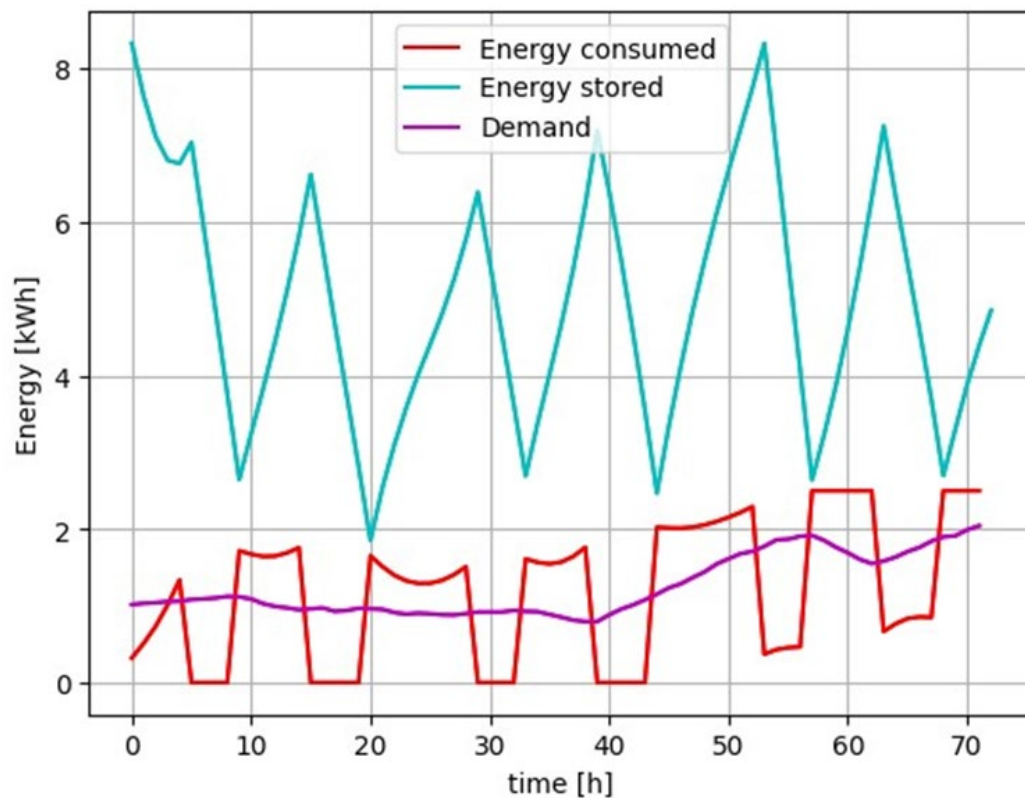
Tomado de Phytion.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 9 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Room Apartament 3” Asignada al espacio de la habitación principal del apartamento 3.

Figura 28. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 9.

Tomado de Phyton.

Seguido a ello, se encuentra la gráfica de operación que corresponde a la zona térmica 10 durante los tres días más críticos del invierno en materia de demanda energética, denominada “TZ Room Apartament 4” Asignada al espacio de la habitación principal del apartamento 4.

Figura 29. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 10.

Tomado de Phyton.

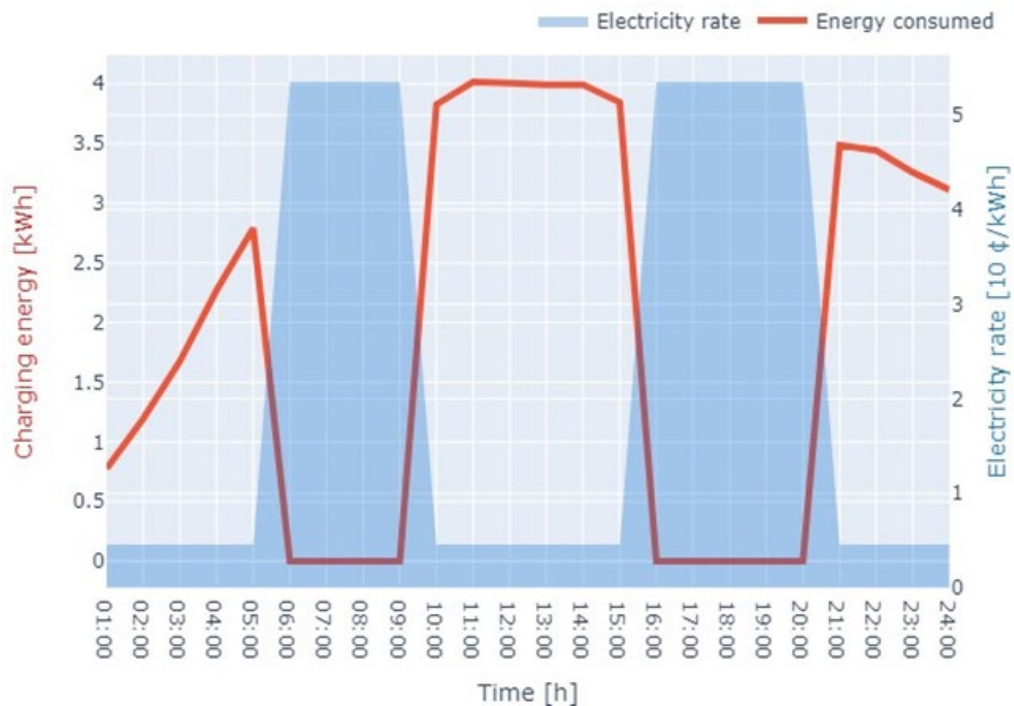
Las gráficas anteriores ilustran la operación óptima de los acumuladores térmicos. El orden de las figuras corresponde al número de la zona térmica, comenzando con el funcionamiento del equipo para las salas de estar, seguido por los corredores y finalmente las habitaciones de los dormitorios de los cuatro apartamentos. En cada imagen, se incluye una leyenda donde "*Energy consumed*" representa la energía consumida para cargar el acumulador térmico, "*Energy stored*" indica la energía almacenada en ese momento, y "*Demand*" se refiere a la energía consumida para mantener el confort térmico dentro de la zona, reflejando así la demanda térmica específica de cada zona térmica. Similarmente, se puede brindar otra perspectiva con el objetivo de ligar el modelo matemático expuesto en la sección a las figuras anteriores y brindar un mayor

entendimiento al proceso realizado, es entonces que se entiende como “*Energy consumed*” como la potencia de carga del acumulador térmico en el instante t para la zona térmica k , “*Energy stored*” es el estado de carga y “*demand*” es la energía que proviene del perfil de la demanda explicados en la sección, también visto como la potencia de descarga.

Las gráficas anteriores resultan fundamentales en este estudio, pues evidencia el cumplimiento de la demanda en cada zona térmica. Esta afirmación, es producto del patrón que se cumple en cada una de las gráficas previamente enunciadas. Como se observa El consumo energético es proporcionalmente al estado de carga, en la mayoría de los casos la energía almacenada es superior a la demanda, lo que garantiza que la batería del almacenamiento térmico siempre tiene una reserva para atender la siguiente hora de demanda exitosamente. En el caso contrario como se observa en las gráficas de la zona 3 y 4, automáticamente el dispositivo compra energía con la prioridad de satisfacer la demanda.

Por otro lado, estudiando la configuración de los horarios de carga y descarga, se puede entender que este fenómeno esta influenciado principalmente por dos razones, la demanda misma y la tarifa. Como se evidencia en las gráficas anteriores, existe una tendencia de evitar la carga durante los periodos de alta definidos por la tarifa D-Flex de Hydro-Québec, los cuales se establece de 6 a 9 am y de 4 a 8 pm, sin embargo, si el sistema requiere energía para suplir la demanda, este posee la facultad de comprar energía a un precio elevado, si llega a ser necesario. El anterior análisis, se puede apreciar en la siguiente gráfica, que corresponde al perfil de consumo energético durante 24 horas de la zona térmica de mayor requerimiento, en materia de capacidad optima, es decir la numero 4. Aquí se aprecia un alto nivel de claridad visual en el fenómeno descrito.

Figura 30. Comparación del perfil de consumo energético del acumulador térmico zona 4 Vs. Tarifa dinámica.



Tomado de Phytton.

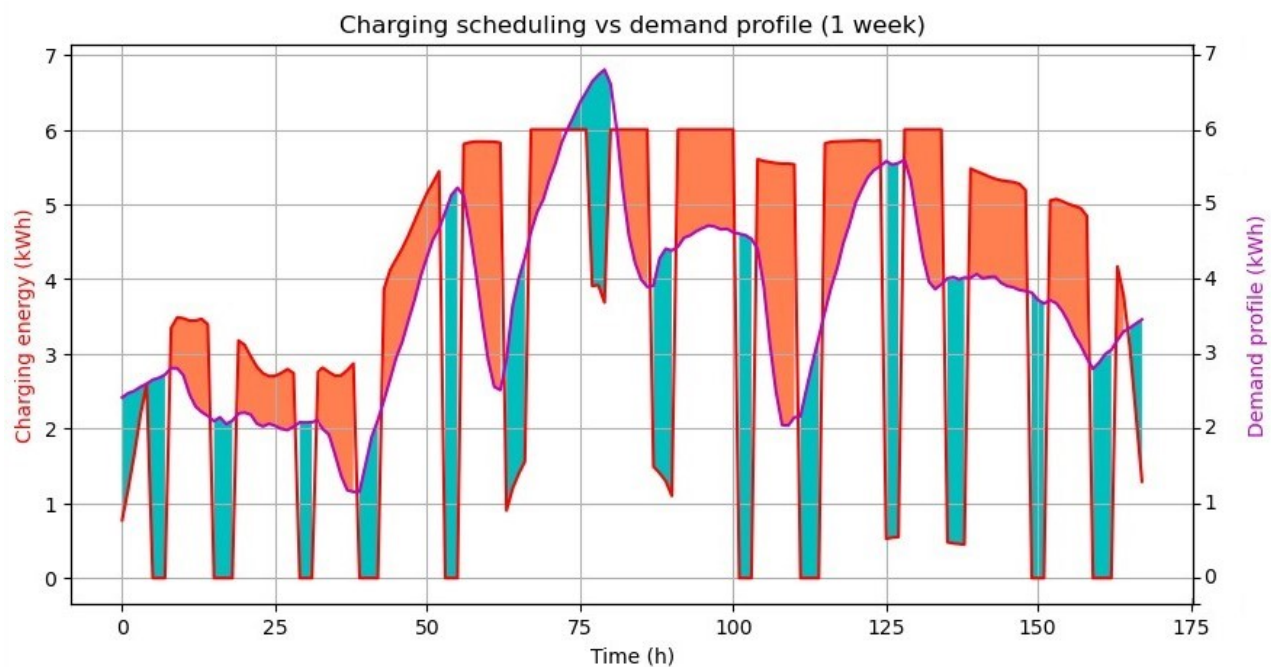
la Figura 30 muestra cómo la programación de carga (Línea roja), definido en la leyenda como “*Energy consumed*”, responde a la tarifa dinámica, es decir, evita cargarse en los periodos donde hay una alta demanda, aquellos penalizados por la banda azul, representa el precio de la electricidad. En este trabajo, se considera el Rate Flex D de Hydro Quebec [3], donde la tarifa aumenta a 53.52 ¢/kWh durante la demanda pico de invierno y en los periodos de demanda fuera de pico se mantiene en 4.58 ¢/kWh, con los periodos pico de invierno de 6 a 9 a. m. y de 4 a 8 p. m. Nótese que durante los periodos fuera de pico, el dispositivo se carga y al mismo tiempo suministra calor para satisfacer los requisitos de demanda. Por el contrario, durante los periodos pico, el acumulador térmico se basa exclusivamente en la energía almacenada en él para satisfacer los requisitos de demanda. Se observa una ligera convergencia en la que se registra consumo fuera

de la tarifa mínima, este comportamiento se deriva del modelo matemático utilizado, donde el acumulador térmico tiene una tasa de carga definida en la ecuación 6. Esta limitación impide cargar el acumulador térmico de manera inmediata en una sola hora, lo que resulta en ocasiones en que el sistema no puede almacenar suficiente energía fuera del período pico.

4.3 Análisis

Si bien es evidente que los acumuladores térmicos conllevan muchos beneficios, referentes a la gestión de la demanda residencial, los resultados del presente estudio motivan dos tipos de análisis. Uno de ellos es el análisis económico en donde encontramos que la implementación de un sistema de acumulador térmico, programa el consumo energético para comprar energía a una tarifa menor a la estándar. La anterior afirmación puede ser evidenciada desde la siguiente grafica donde se brinda una comparación durante una semana de operación entre la demanda y la energía consumida en la zona térmica número 4, correspondiente a la sala de estar del apartamento número 4.

Figura 31. Operación del acumulador térmico para la zona térmica 4.



Tomado de Phytion.

La figura anterior, permite mostrar la respuesta que da el acumulador térmico de la zona 4 y de todas estas en general para evitar los períodos de máxima demanda. Aquí, la línea azul es el perfil de demanda y la línea roja es la energía de carga como se observa hay regiones subrayadas que representan la redistribución del consumo energético ya que las áreas azules corresponden el desplazamiento de la energía de los períodos pico a los períodos fuera de pico representados en color rojo. Nuevamente se observa como la tendencia de la variable “*Charging energy*” o energía consumida por el dispositivo, es de tratar de almacenar durante los horarios de las 9 a las 16h y de las 21 a las 6 horas del siguiente día.

Esta grafica es fundamental ya que permite hacer hincapié en el desplazamiento de carga, algo fundamental para entender los beneficios de los acumuladores térmicos, ya que aparte de evitar una sobrecarga de la red y permite hacer un consumo inteligente desde el uso racional de la energía [30]. Esto implica una reducción en la factura para los usuarios, debido a que el consumo de energía se desplaza a períodos de bajo precio durante el día. Las zonas subrayadas en rojo corresponden a la operación optima del acumulador termico y como previamente se evidencio en la Figura 31, los horarios de carga evitan las elevadas tarifas de los picos de demanda.

El análisis anterior, permite una aproximación basada en las tarifas, considerando la comparación de dos escenarios. El primero de ellos viene del mismo edificio, bajo la operación de “*Electric Baseboard heaters*”, Este sistema de calefacción permite que el prototipo diseñado se clasifique como de uso residencial doméstico, lo que hace aplicable la tarifa Rate D de Hydro Quebec [3]. Esta tarifa implica un valor fijo de 10.342 ¢/kWh a partir de un consumo mínimo de 40 kWh. Comparando este escenario con la operación de acumuladores térmicos y el desplazamiento de la carga a períodos donde la tarifa es de 4.58 ¢/kWh, como se evidencia en las gráficas, se puede inferir que una reducción en la factura de entre el 50% y el 65% de la factura total de un mes de invierno es posible. Esta reducción significativa se logra gracias al

dimensionamiento óptimo y a la intervención de la tarifa dinámica. Sin embargo, esta aproximación esta netamente ligada a los resultados obtenidos por este trabajo y la comparación de las tarifas.

Dentro de la literatura, el estudio de (Syed, 2011) presentó una metodología de dimensionamiento de acumuladores térmicos eléctricos a nivel residencial, en el contexto de la provincia canadiense de Nueva Escocia. Entre sus hallazgos, el autor destacó que es posible lograr una reducción del 48% en la factura anual con la operación de un acumulador térmico por vivienda. Es importante señalar que existe una diferencia entre los fabricantes en los que se basó este estudio y el trabajo mencionado. La principal discrepancia radica en la optimización: mientras que (Syed, 2011) basó el dimensionamiento en escalas proporcionadas por ASHRAE, este trabajo considera un modelo que contempla tanto el fenómeno físico como la tarifa dinámica. Gracias a la física incorporada en la metodología de este trabajo, se ha obtenido una aproximación diferente que contribuirá a discutir un método definitivo para el dimensionamiento de acumuladores térmicos eléctricos a nivel residencial [26].

De los resultados otro tipo de análisis que surge es la oferta comercial. El trabajo se basó en los modelos de “*STEEFES*” proveedor norteamericano de dispositivos de “*Electric Thermal Storage*” a nivel residencial. Este trabajo utilizo de referencia la línea “*Room unit*”, modelo 2101 el cual es ideal para espacios residenciales (Steeffes, 2020), con el fin de establecer las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento dentro de cada zona térmica. Una vez hecho el dimensionamiento, se obtuvieron las capacidades óptimas para cada zona térmica. Sin embargo, si este dimensionamiento se condujera a un escenario de la vida real enfrentaría el desafío de la comercialidad, a continuación, se encuentra una tabla que refleja como seria el dimensionamiento final utilizando las capacidades disponibles de la línea “*Room unit*” del fabricante mencionado [18].

Tabla 5. *Dimensionamiento final de capacidad optima de almacenamiento.*

Dimensionamiento comercial					
Numero.	Nombre	Capacidad óptima de almacenamiento (kWh)	Modelo de <i>steefes</i> recomendado	Capacidad nominal (kWh)	Numero de dispositivos
1	TZ Apartament 1	3.73	2103	4.5	1
2	TZ Apartament 2	3.31	2103	4.5	1
3	TZ Apartament 3	21.4	2106	10.8	2
4	TZ Apartament 4	20	2106	10.8	2
5	TZ Corridor 1	2	2102	3.0	1
6	TZ Corridor 2	9.51	2106	10.8	1
7	TZ Room Apartament 1	2.38	2102	3.0	1
8	TZ Room Apartament 2	3.34	2103	4.5	1
9	TZ Room Apartament 3	7.42	2105	7.5	1
10	TZ Room Apartament 4	8.33	2103	4.5	2

Fuente: propia.

La tabla anterior tiene como objetivo resumir los requisitos de cada zona, detallados en la sección 4.2, y compararlos con los modelos de acumuladores térmicos disponibles y sus capacidades nominales. Se observa que existen diversos tipos de modelos adecuados para satisfacer los requisitos de cualquier tipo de espacio del prototipo estudiado. Sin embargo, es común encontrar que los modelos disponibles no tienen capacidades nominales que coincidan con las óptimas. Esto puede resultar en un sobredimensionamiento en situaciones de la vida real, lo cual afecta el rendimiento de los sistemas dimensionados, impidiendo alcanzar su máximo beneficio. Se puede apreciar que en muchas zonas térmicas este sobredimensionamiento puede ser de hasta 1 kWh.

Si bien, en el presente documento es materia de análisis los productos de un solo fabricante, lo que se debe remarcar es que si no se realiza una aproximación comercial a las capacidades optimas a través de distintos modelos, no se podrá sacar el máximo provecho del almacenamiento

térmico. Por lo que, los resultados de este estudio se muestran como la oportunidad de profundizar en metodologías y aproximaciones que permitan una mayor facilidad en la aplicación de estos sistemas. De igual forma, la investigación en este campo puede incentivar a los fabricantes a ampliar el portafolio de modelos bajo la premisa de satisfacer nuevas necesidades comerciales. Este trabajo contribuye a profundizar la investigación en estrategias para la gestión de la demanda residencial, como lo son los acumuladores térmicos, para un consumo más inteligente.

5. Conclusiones

La metodología de optimización propuesta para sistemas de acumuladores térmicos eléctricos presenta beneficios significativos en términos de operación y dimensionamiento. La capacidad óptima de operación garantiza que las demandas térmicas se satisfagan con una gestión energética adecuada y un uso racional de la energía. Además, la operación óptima de los sistemas de acumuladores minimiza la dependencia de las costosas tarifas de período pico de invierno, reduciendo así los gastos operativos generales. Los hallazgos de este trabajo destacan la importancia de investigar en las estrategias de gestión energética. Al adaptarse a los patrones cambiantes de demanda, las tarifas eléctricas dinámicas y la optimización de los parámetros operativos, se demuestra la capacidad de los acumuladores térmicos para lograr ahorros de costos y sostenibilidad ambiental. En esencia, la integración de los dispositivos optimizados no solo mejora la eficiencia energética, sino que también fomenta la flexibilidad de la red al desplazar la carga durante condiciones pico y, por lo tanto, reducir la congestión en la red, haciendo que se pueda abastecer la demanda energética de una comunidad, con una menor generación eléctrica salvaguardando recursos vírgenes.

En cuanto al objetivo propuesto para la creación de un modelo térmico virtual de un bloque de apartamentos simulado mediante un software con el fin de cuantificar los perfiles de la demanda

se puede concluir que se logró con éxito la recolección, elaboración y análisis de datos mediante el uso del framework de OpenStudio. Como se destaca en la sección 3.2.1, este software proporciona un entorno propicio para la parametrización de los modelos, considerando diversas variables como el clima y las características específicas de las viviendas, lo cual resultó crucial para el desarrollo del modelo final. Los resultados de la simulación, presentados en la sección 4.1.1, muestran los perfiles de demanda energética para el año 2022, desglosados por zonas térmicas. Estos resultados fueron exitosamente extraídos y empleados en el presente estudio, contribuyendo así a su realización y aportando información relevante para esta investigación, ya que permitió entender dinámicas de consumo e identificar variables fundamentales en el consumo energético. Lo anterior permite afirmar que la generación de datos sintéticos se presenta como una herramienta válida para llevar a cabo aproximaciones que faciliten la prevención, el control o la estimación de dimensiones en sistemas diseñados para abordar problemas de ingeniería. En este trabajo, se presenta una metodología para construir un prototipo virtual que representa un bloque de apartamentos típico. La generación de estos datos posibilitó el desarrollo del proyecto en ausencia de datos experimentales.

En cuanto al objetivo de formular un problema de optimización convexo utilizando datos de simulación para minimizar los costos en función de la capacidad óptima mínima, se puede concluir que se logró desarrollar un problema que abarca una amplia gama de variables dentro de los límites de este proyecto. Se tomaron en consideración los perfiles de demanda generados previamente mediante simulaciones en el entorno virtual de OpenStudio. La sección 3.3.1 destaca la creación de un modelo matemático cuyos resultados, presentados en la sección 4.2, representan la capacidad óptima que se requiere en cada zona térmica, del apartamento considerando los datos sintéticos ingresados con las diferentes variables que fueron consideradas. Estos resultados, por un lado, valorizan las herramientas y los motores de simulación, ya que evidencian una aplicación potencial enfocada en los problemas de ingeniería y por otro lado incentivan divulgación de los sistemas de

almacenamiento térmico eléctrico para que se comercialicen a una mayor escala. en este documento se evidencio el dimensionamiento y la operación optima de un sistema diseñado para la escala residencial, el cual brinda beneficios para la red, ya que evita la saturación y los altos picos de consumos. En resumen, fue posible mostrar una perspectiva que incentive a la masificación de estos sistemas en el contexto de Quebec.

De igual forma, en lo concerniente al objetivo de analizar los resultados obtenidos después del dimensionamiento para emitir un concepto final. Se pudo concluir que, a pesar de que se logre dimensionar una capacidad óptima para cada zona térmica, los acumuladores térmicos eléctricos disponibles en el mercado suelen tener una capacidad diferente, lo que genera indirectamente un sobredimensionamiento, esto se evidencia en la tabla 5 de la sección 4.3. Para este problema este estudio propone, la posibilidad de usar un acumulador térmico para dos zonas térmicas, haciendo que la de menor demanda opere con el calor migrante que proviene de la otra zona. Por otro lado, una reflexión que surge de esta problemática es la necesidad de estudiar más a fondo el comportamiento de estos sistemas a nivel residencial por parte de los fabricantes, de esta forma se pueden identificar nuevas necesidades comerciales que permitan aumentar la disponibilidad de modelos adecuados a las diferentes necesidades. En resumen, las referencias es un limitante para operar los acumuladores térmicos a nivel residencial con el menor precio posible, sin embargo, existen medidas que mitigan este sobre costo. Eventualmente, con la investigación en este campo se reducirá la brecha de este sobre costo.

Los resultados de este trabajo permitieron entender que actualmente se requiere una exploración profunda en estrategias de la gestión de la demanda, para maximizar los beneficios previamente discutidos. La creciente investigación en este campo puede traer consecuencias positivas para facilitar la implementación de este tipo de sistemas de calefacción, desde el aumento en el portafolio de modelos, para diferentes necesidades o el aumento de los ya existentes incentivos

económicos. Este tipo de metodologías muestran resultados sujetos a consideraciones físicas que brindan una perspectiva general de la operación. Sin embargo, existen muchas variables que deben ser consideradas a nivel investigativo y aplicativo. Para futuros trabajos, se sugiere estudiar la incertidumbre en la demanda ya que esta puede verse afectada por cualquier comportamiento tanto de los ocupantes como de las condiciones climáticas y en general de cualquier fuente de incertidumbre.

Referencias

- [1] B. Gauthier, "La política cultural de la ciudad de Trois-Rivieres," Agenda de la cultura 21. Premio internacional CGLU, México, 2003. Disponible en:
https://www.agenda21culture.net/sites/default/files/files/good_practices/troisrivieres-spa_def.pdf.
- [2] La ville de Trois-Rivieres, "À propos de la Ville, Planification," 2019. Disponible:
<https://www.v3r.net/a-propos-de-la-ville/planification/developpement-durable>.
- [3] Hydro-Quebec, "Rates for residential customers (domestic rates)," 2024.
Disponible : <https://www.hydroquebec.com/residential/customer-space/rates/>.
- [4] A. Arteconi, N. J. Hewitt, and F. Polonara, 'State of the art of thermal storage for demand-side management', *Applied Energy*, vol. 93, pp. 371–389, 2012.
- [5] Steffes, "Steffes Electric Thermal Storage (ETS) – Unidad de Habitación," 2024.
Disponible: <https://steffes.com/ets/room-unit/>.
- [6] A. A. Rodriguez, "Optimización convexa," Universidad de Sevilla Escuela, 2014.
- [7] A. Vielba, "Métodos de optimización convexa en aprendizaje automático," 2019.
- [8] A. Garcés Ruiz, 'Optimización convexa: aplicaciones en operación y dinámica de sistemas de potencia', 2020.
- [9] B. Daryanian and R. E. Bohn, 'Sizing of electric thermal storage under real time pricing', *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 35–43, 1993.
- [10] S. Diamond and S. Boyd, 'CVXPY: A Python-embedded modeling language for convex optimization', *Journal of Machine Learning Research*, vol. 17, no. 83, pp. 1–5, 2016.
- [11] H. Ji, H. Wang, J. Yang, J. Feng, Y. Yang, and M. O. Okoye, 'Optimal schedule of solid electric thermal storage considering consumer behavior characteristics in combined electricity and heat networks', *Energy*, vol. 234, p. 121237, 2021.
- [12] N.R.C. Canada, national energy code of Canada for buildings - user's guide, 2019.

- [13] W. J. Cole, E. T. Hale, and T. F. Edgar, 'Building energy model reduction for model predictive control using OpenStudio', in 2013 American control conference, 2013, pp. 449–454.
- [14] S. Wong and J.-P. Pinard, 'Opportunities for smart electric thermal storage on electric grids with renewable energy', IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 1014–1022, 2016.
- [15] OpenStudio. (2023). Disponible en: <https://openstudio.net/>
- [16] B. L. Ball, N. Long, K. Fleming, C. Balbach, and P. Lopez, 'An open source analysis framework for large-scale building energy modeling', Journal of Building Performance Simulation, vol. 13, no. 5, pp. 487–500, 2020.
- [17] Room unit- Steffes. (2020). Steffes. Disponible : <https://steffes.com/ets/efficiency-nova-scotia-rebates/>
- [18] E. Weaver, N. Long, K. Fleming, M. Schott, K. Benne, and E. Hale, 'Rapid application development with Openstudio', National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2012.
- [19] J. A. Dominguez, L. Rueda, N. Henao, K. Agbossou, and J. Campillo, 'Distributed co-simulation for smart homes energy management in the presence of electrical thermal storage', in IECON 2022--48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2022, pp. 1–6.
- [20] J. Domínguez-Jiménez, N. Henao, K. Agbossou, A. Parrado, J. Campillo, and S. H. Nagarsheth, 'A Stochastic Approach to Integrating Electrical Thermal Storage in Distributed Demand Response for Nordic Communities With Wind Power Generation', IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 4, pp. 121–138, 2023.
- [21] B. Daryanian and R. E. Bohn, 'Sizing of electric thermal storage under real time pricing', IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 35–43, 199.

[22] R. L. Storry, G. Ault, and S. Galloway, ‘The multi-objective optimisation of electrical thermal storage to compensate for the intermittency and variability of renewable generation in distribution networks’, 2013.

[23] W. Devia, K. Agbossou, and A. Cardenas, ‘An evolutionary approach to modeling and control of space heating and thermal storage systems’, *Energy and Buildings*, vol. 234, p. 110674, 2021.

[24] R. L. Storry, G. Ault, and S. Galloway, ‘The multi-objective optimisation of electrical thermal storage to compensate for the intermittency and variability of renewable generation in distribution networks’, 2013.

[25] A. M. Syed, ‘Electric thermal storage option for Nova Scotia power customers: A case study of a typical electrically heated Nova Scotia house’, *Energy Eng.*, vol. 108, no. 6, pp. 69–79, Oct. 2011.

[26] Cananada Energy Regulator, "Canada's Energy Future," Canada Government, 2009.

[27] M. Petersen, L. H. Hansen, and T. Mølbak, ‘Exploring the value of flexibility: A smart grid discussion’, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 21, pp. 43–48, 2012.

[28] Naciones Unidas, "Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible," *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

[29] Hydro-Québec, "Annual Report," Hydro-Québec, 2023. [Online]. Disponible en : <https://www.hydroquebec.com/about/publications-reports/annual-report.html>.

[30] Ministerio de Ciencia Tecnologia e Innovacion Productiva de Argentina, "USO RACIONAL Y EFICIENTE de LA ENERGÍA (UREE)," 2011

[31] Branch, Canadian Government. “Consolidated Federal Laws of Canada, Energy Efficiency Act., 14 Dec. 2017, lois-laws.justice.gc.ca/eng/acts/E-6.4

[32] Environment and Climate Change Canada, “Historical Climate Data - Climate - Environment and Climate Change Canada,” Weather.gc.ca, 2019. <https://climate.weather.gc.ca>