

Hacia Campus sostenibles, caso de estudio: Campus Pucón, Universidad de la Frontera

Antonio Bascur-Escobar¹, Marcela Muñoz-Catalán¹, Rodrigo Soto-Valle^{1,*}

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de la Frontera, Chile.

* rodrigoandres.soto@ufrontera.cl

Resumen

Este trabajo presenta un diagnóstico energético realizado al Campus Pucón de la Universidad de La Frontera. Se analizan los registros de consumo caracterizando las líneas energéticas tanto eléctrica como térmica a través de su línea base e indicadores de desempeño energético. Asimismo, se proponen medidas de mejora de eficiencia energética enfocadas en el contexto caracterizado. Los resultados muestran un consumo total de 166 MWh/año con un 37% en el área eléctrica y 63% en la térmica, aproximadamente. De esta forma, se recomiendan opciones en el ámbito de la gestión, adición de componentes y recambios tecnológicos que muestran potenciales mejoras en la eficiencia energética del Campus.

Palabras clave: diagnóstico energético, eficiencia energética, campus sostenible, indicadores energéticos

Abstract

This work presents an energy assessment carried out at the Campus Pucón of the Universidad de La Frontera. Historical consumption is analyzed, characterizing both electrical and thermal energy lines through their baseline and energy performance indicators. Consequently, energy efficiency improvement measures are proposed focused on the characterized context. The results show a total consumption of 166 MWh/year with 37% in the electrical area and 63% in the thermal, approximately. Thus, options are recommended in the field of management, new components and technology that show potential improvements in the energy efficiency of the Campus.

Keywords: energy assessment, energy efficiency, sustainable campus, energy indicators

1. Introducción

La sociedad actual enfrenta serios problemas debido al cambio climático consecuencia principalmente al factor antropógeno [1]. La industria, el transporte y el uso en edificaciones son importantes fuentes de consumo energético y consecuentemente aportan significativamente a la contaminación excesiva [2]. En particular, este último ha sido tomado con atención entre investigadores, como, por ejemplo, en campus universitarios [3-16], dado su alto consumo energético y alto impacto en sus ecosistemas sin ser necesariamente de uso residencial. Gallachóir et al. [3] utilizaron indicadores de desempeño energético (IDE), en la Universidad de Cork, para la toma de decisiones y gestión de energía destacando que, con datos sencillos como las facturas de servicios, el número de

estudiantes, el espacio entre otros puede guiar a ideas interesantes y decisiones útiles a través de la identificación de hitos históricos relevantes. Escobedo et al. [4] estudiaron diferentes escenarios energéticos y de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en torno al crecimiento esperado de la Universidad Nacional Autónoma de México mostrando que la implementación de medidas de mejora de eficiencia energética (MMEE), basada en auditorías de distintos niveles, puede representar un ahorro energético de 8% y la disminución de GEI de 11% aproximadamente. Lourenço et al. [5] estudiaron la viabilidad del uso de IDE en estrategias sustentables en varias instituciones educacionales de Portugal evidenciando que cuando las estrategias no consideran la interacción usuario/edificio/sistemas pueden ser poco efectivas debido al impacto negativo en las acciones futuras de

los usuarios. Pappi et al. [6] realizaron un estudio del consumo energético en la Universidad Aristóteles de Tesalónica mostrando patrones característicos a las estaciones del año donde concluyen su generación debido al gran consumo energético de equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y donde sugieren cambios de comportamiento por sobre paquetes del ofertorio que tarifa. Vásquez et al. [7] analizaron el estado y reducción de GEI en el campus Curicó de la Universidad de Talca mostrando que alrededor del 68% de la contribución de GEI provienen de actividades dentro de la organización, pero de fuentes que no son propiedad ni están controladas por ella concluyendo, entonces, que el mejor escenario para su disminución es que los estudiantes que viven cerca del campus sustituyan el uso de vehículos motorizados por bicicletas. Gul et al. [8] analizaron la relación del uso de energía con las actividades académicas en la Universidad de Heriot-Watt a través de encuestas y datos de consumo eléctrico en tramos de treinta minutos. Se muestra una baja o nula incidencia de la ocupación de los estudiantes y el mayor consumo energético atribuido netamente al acondicionamiento térmico de las instalaciones, automatizado sin consideraciones. Han et al. [9] simularon, utilizando eQuest el comportamiento energético de la biblioteca de la Universidad de Ciencia y Tecnología en China logrando resultados con hasta 2% de diferencia con valores de mediciones mensuales reales; evidenciando, así una prometedora herramienta para analizar casos hipotéticos. Amber et al. [10] utilizaron datos históricos del consumo eléctrico de un edificio administrativo y uno académico de la Universidad de London South Bank para realizar un modelo de predicción en base a datos atmosféricos. A través de una regresión múltiple se logra predecir el consumo con hasta un 8% de diferencias en las estadísticas de promedio, máximos y mínimos, destacando así la importancia de mantener datos históricos en tales instalaciones. Popoola et al. [11] ejecutaron un análisis de grupos a través de un testeo post-hoc en datos históricos de consumo eléctrico en la Universidad de Covenant mostrándose como una herramienta prometedora en el reconocimiento de patrones energéticos no revelados en análisis estadísticos básicos. Lo-Iacono-Ferreira et al. [12] a través de un estudio energético a la Escuela Politécnica Superior de Alcoy de la Universidad Politécnica de Valencia

destacan que el uso de IDEs permiten la identificación de tendencias, revisión de eficiencia energética (EE), oportunidades y estrategias de MMEE, contando con una gran adaptabilidad. Sin embargo, estas poseen la desventaja de no capturar componentes cualitativos y la eficacia de su uso depende de apoyos directivos o cambios estructurales. Ocampo et al. [13] presentan el caso de estudio de La Universidad Federal de Itajubá donde se cuantifican potenciales reducciones de consumo energético y emisiones GEI de 3.6MWh y $2.3tCO_{2eq}$, respectivamente tras analizar factores como uso (área), energía térmica (acondicionamiento), temperatura (variabilidad diaria) y estacionalidad. No obstante, se destaca la alta variabilidad y lo desafiante de la caracterización por la discontinuidad de captura de información por el personal. Hong et al [14] realizaron un estudio a la Universidad Nacional de Kyungpook donde a través de la implementación de diferentes MMEE lograron demostrar diferentes alcances; así la integración de nuevas tecnologías mostró potencial de reducción del consumo eléctrico y térmica en un 11% y 6, respectivamente. Mientras que aplicar estrategias de EE un 12% y 7%; y la implementación de energías renovables 10% y 3% en los mismos tópicos. Cretu et al. [15] obtuvieron la línea base de la demanda en la Universidad Técnica de Cluj-Napoca, a través de los métodos de redes neuronales e igualación de demanda diaria; ambos basados en métricas de error cuadrático medio. Ambos métodos permiten generar una respuesta confiable en la aplicación de control a la curva de carga agregada en tiempo real. Venegas et al. [16] estudiaron MMEE al sistema de aire acondicionado de la Universidad de Santiago de Chile mostrando que una intervención de control solar, reemplazo de ventanas, reducción de iluminación y aislamiento de techos permite la reducción de hasta un 7% de la demanda energética total, aproximadamente.

En particular, Chile ha desarrollado una importante política desde la declaración de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en el 2015 [17]. Durante el 2018, a través de la ley 21094 sobre Universidades estatales, se reconoce y regula el rol de estas instituciones en materias del desarrollo sustentable del país entre otras [18]. Durante el año 2021 se publica la ley sobre EE en Chile [19] regulando materias relevantes como consumidores de energía y sistemas de gestión energética. Adicionalmente, se espera que el aporte de la EE en la ruta hacia la

carbononeutralidad sea del 7% [20]. En el 2022 se publica el plan nacional de EE en donde parte de las medidas mencionadas en la EE de edificaciones son la incorporación de estándares que permitan disminuir la demanda térmica para edificios de uso educacional y salud, e implementar la aplicación de estándares de EE y renovación tecnológica en organismos del estado [21]. Las IES han desarrollado, y en concordancia al llamado particular del país hacia tal escenario, acuerdos de producción limpia [22] que contienen entre sus objetivos la gestión de Campus implementando medidas de prevención, eficiencia y mitigación mediante la gestión de la energía, residuos, agua y biodiversidad, para avanzar hacia la carbono neutralidad.

En general, la literatura es variada en metodologías y ubicaciones de los casos de estudio; sin embargo, existe muy poca aplicación al contexto de Chile. Más aún, la macro zona sur de este país, que posee cualidades atmosféricas; i.e., uso energético, particulares [23], mantiene insuficiente investigación aplicada en la gestión energética de las instituciones de educación superior (IES). Este artículo presenta un diagnóstico energético realizado al Campus Pucón de la Universidad de La Frontera. De esta forma, se contribuye a la caracterización base del territorio con un caso práctico en la macrozona, al cumplimiento de objetivos normativos del país [18-22] y compromisos internos de la institución estudiada, en términos de sustentabilidad [24-25].

En lo que resta del documento, se realiza una contextualización al caso de estudio en la Sección 2. Posteriormente, la metodología en la cual los datos son recopilados y analizados en la Sección 3. Los resultados son expuestos en la Sección 4 junto con la discusión de las componentes relevantes en cada uno de ellos para finalizar en la Sección 5 con las conclusiones más importantes del trabajo.

2. Campus Pucón

El Campus Pucón (CP) es una de las cuatro principales dependencias de la Universidad de la Frontera, Fig. 1. Ubicado en la ciudad de Pucón, en sus inicios, siendo un establecimiento educacional de primaria en 1938 bajo el nombre de Estrella de Chile [26] hoy se encuentra catalogado como patrimonio comunal [27], impartiendo carreras técnicas de turismo y enfermería; además de ser un nexo clave en cultura y vinculación con el medio de la comunidad local.



Figura 1. Frontis Campus Pucón, Universidad de la Frontera.

Fuente: Personal del Campus Pucón.

Las instalaciones cuentan con dos caras principales: Caupolicán (CC) y Lincoyán (CL) de dos niveles cada una; y adicionalmente un patio común con Construcciones Exteriores (CCEE). La Figura 2 muestra un plano general de la planta inferior. Las dependencias están constituidas por una superficie construida de 912 m^2 (CC), 922 m^2 (CL) y 165 m^2 (CCEE). Se destacan los empalmes eléctricos de cada cara (C, rojo tarifa BT4.3; L, azul tarifa BT1 [28]), señalando a su vez, la dependencia energética de CCEE a CL y sectores los cuales son parte del edificio principal (cuadros verdes Fig. 2) pero funcionan con empalmes independientes y no figuran como consumo energético. A la fecha, el Campus cuenta con 42 funcionarios y 194 estudiantes matriculados aproximadamente, además, usuarios flotantes (visitas culturales, autoridades, entre otros) que rondan las 130 personas.

A continuación, se presenta la metodología mediante la cual se recopila y analiza la información energética del Campus.

2. Metodología

Este capítulo aborda la implementación del diagnóstico energético al CP en el periodo de estudio julio 2022 y agosto 2023. Se establece la metodología para el desarrollo de la Línea Base Energética (LBE), IDEs y MMEE, siguiendo las directrices de la guía metodológica de auditoría energética en edificación [29-30]. Se analizan los consumos energéticos recolectados para este edificio, tanto para CC, como para CL. Mediante solicitud de datos a personal del CP, se obtienen los datos de consumo energético tanto eléctrico como térmico (ver Figs. 3 y 4). Este último considera una conversión de energía equivalente [31]. En el siguiente apartado se presenta la metodología

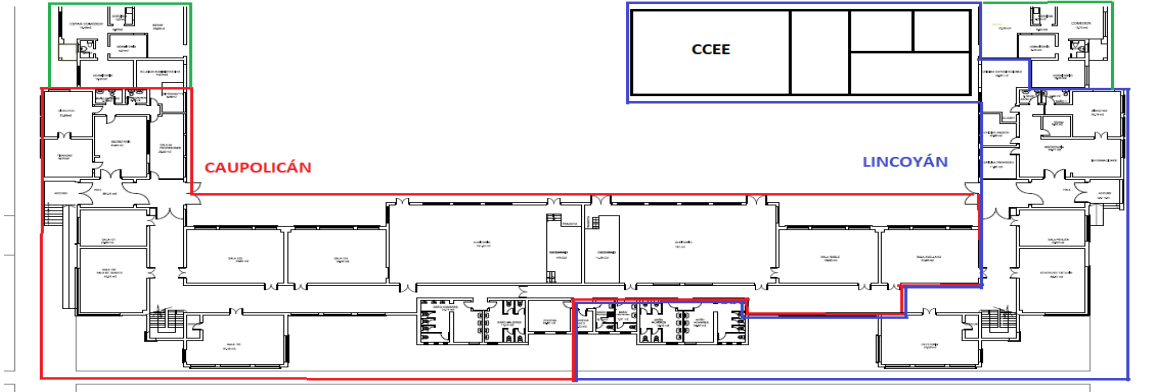


Figura 2. Vista superior primera planta Campus Pucón, secciones resaltadas. Fuente: elaboración propia.

para la confección de la LBE a través de los datos mencionados.

2.1. Línea base energética

Para la búsqueda de una LBE para el CP, se utilizan variables climáticas representativas de la estación de medición de La Araucanía de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) [32], en adición de los consumos eléctricos asociados al CP. Mediante un ajuste lineal de una variable (LU), Ec. (1), y multivariable (LM), Ec. (2). Esto último a través de las permutaciones posibles entre dos variables atmosféricas. De esta forma, se busca el máximo valor para el coeficiente de determinación, R^2 [33] entre consumo energético (E) y variables atmosféricas ($\{V\}$). Se estudian diez variables climáticas en correlación con el consumo energético: (i) temperatura máxima (T_{max}); (ii) temperatura mínima (T_{min}); (iii) temperatura media (T_{mean}); (iv) humedad (H); (v) horas sol (HS); (vi) nubosidad (N); (vii) velocidad de viento (u); (viii) presión (P); (ix) precipitaciones (PP); e (x) índice de radiación ultravioleta tipo B (UV). Buscando claridad y síntesis, solo las variables escogidas son presentadas en este documento; por completitud, el lector puede encontrar el listado completo en la DMC [32].

$$E = \alpha_0 + \alpha_1 V_i \quad (1),$$

$$E = \beta_0 + \beta_1 V_i + \beta_2 V_j \quad (2),$$

donde α y β son parámetros de ajuste.

2.2. Indicadores de desempeño energético

Se establecen datos que permiten cuantificar el desempeño energético actual respecto a variables que

influyen en su evolución a lo largo del tiempo. Estas se obtienen analizando el desempeño energético interno en correlación con los datos de la LBE obtenida o con las variables de uso del CP (Ecs. 3, 4 y 5). De este modo, los indicadores usados en este estudio son:

$$IDE1 = \frac{E_{eléctrico}}{A} \quad (3),$$

donde $E_{eléctrico}$ es el consumo energético eléctrico total y A la superficie CC, CL o CP. Así, IDE1 permite observar el consumo de energía en virtud de, por ejemplo, la simetría del edificio. Adicionalmente, se incluye un indicador asociado a las emisiones equivalentes por uso de energía, IDE2 en Ec. (4).

$$IDE2 = \sum_i E_i \cdot FE_i \quad (4),$$

donde E_i y FE_i son la energía y factor de emisión de CO_2 asociado a cada energético (electricidad o fuente térmica) [34-35-36]. Además, se utiliza un indicador de actividad en la institución, relativo a la ocupación del CP, IDE3 en Ec. (5)

$$IDE3 = \frac{\sum_i E_i}{N} \quad (5),$$

donde N representa la cantidad de personas que asisten al CP durante el periodo de estudio, incluyendo (i) estudiantes matriculados; (ii) funcionarios; y (iii) visitantes. Esto permite una estimación del consumo energético por persona.

Tabla 1. Resultados ajuste de regresiones de línea base energética. Fuente: elaboración propia.

Ajuste	LU				LM				
Sector	Variables	α_0	α_1	R^2	Variables	β_0	β_1	β_2	R^2
Cara Lincoyán	PP	4.88	826	0.44	u, PP	2166	-316	-470	0.54
Cara Caupolicán	UV	-243	4547	0.62	T_{max}, UV	5574	241	-352	0.70
Campus Pucón	UV	-333	6422	0.60	u, PP	8036	427	-549	0.66

2.3. Medidas de mejora de eficiencia energética

Inicialmente se establece el tipo de MMEE según tipo de inversión, hábitos o gestión operacional (inversión nula); adición de componentes (recursos acotados); o recambio tecnológico (sumas significativas) [37]. Luego, para la implementación de MMEE se utilizan criterios de selección: (i) se aplica el principio de Pareto con respecto al de consumo eléctrico del CP entorno a los desagregados por sistemas principales y subsistemas asociados [29]; y (ii) preferencias de implementación por parte de autoridades del CP enfocado a metas del APL e información disponible para estudio técnico económico.

3. Resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos del diagnóstico energético. En primer lugar, se exponen los resultados de la LBE desarrollada a través de los métodos de LU y LM, para cada sector del CP. Posteriormente, se detallan los IDEs calculados y finalmente, se presentan las MMEE a través de un análisis técnico/económico.

3.1. Línea base

Se exponen las combinaciones que resultan el R^2 más elevado para cada método, con respecto a cada cara y el Campus. Los resultados de las variables seleccionadas, parámetros de ajuste y comparación están resumidos en la Tabla 1. Se pueden apreciar los valores más altos de correlación para el método LM cercano al criterio $R^2 \geq 0,75$ [33] en el caso del CP; contrario al caso de CL. En adición, se desprende que aún con un valor bajo de correlación, se obtiene una curva cualitativamente correcta entre consumo real y LBE, pero con rangos de diferencia altos en los extremos del periodo de estudio.

Las Figs. 3 y 4 exponen una comparación gráfica entre las LBE y el consumo real para las caras y Campus,

respectivamente. Resulta evidente la asimetría energética entre las caras, Fig. 3, aun cuando estructuralmente similares, la distribución eléctrica diferente de sus empalmes (ver Fig. 2) afecta a una carga mayor en la CC, superando a CL en hasta el doble de energía para ciertos periodos. Durante el periodo del año 2023 se aprecia un aumento significativo en el transcurso de este, por motivos estacionales y también un aumento en la cantidad de funcionarios, según los datos recopilados. Adicionalmente se puede observar una sobreestimación durante el periodo 2022 y una subestimación para el 2023; concebiblemente, por el motivo antes descrito.

Se puede ver que el mejor ajuste de cada método se produce en ocasiones con variables climáticas diferentes (Tabla 1). Ambos métodos comparten información de precipitación e índice de radiación ultra ultravioleta tipo B con la diferenciación que LM incluye velocidad del viento y temperatura lo que incrementa en todos los ajustes sectoriales el factor de correferencia. Esto puede deberse a que los consumos en periodos de climatización provienen de energéticos diferentes, i.e., eléctrico y térmico; donde este último no está considerado en el ajuste de LBE dado que no es posible desacoplar la energía en un homólogo al empalme eléctrico.

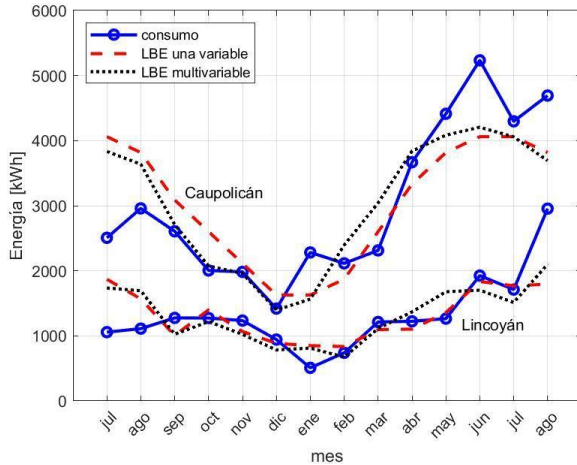


Figura 3. Consumo energético y línea base de caras Lincoyán y Caupolicán.

Fuente: elaboración propia.

En el caso del CP, Fig. 4, se puede apreciar una notoria influencia del perfil energético de la CC, donde el aporte de la CL se percibe como un offset durante el 2022 y luego acrecentando la notoria pendiente positiva durante en el 2023. Con respecto al ajuste de LBE, este presenta un acoplamiento de las variables climáticas distintivas de CL haciendo evidente su efecto. Se puede notar una curva más suave en el caso LU en contraste con el LM que tiende a exagerar los puntos de inflexión para el consumo real. Se hipotetiza que el motivo es la inclusión de valores promedio en los datos atmosféricos y que la inclusión de una línea energética más granulada temporalmente pueda influir en un resultado más suave. Si bien la base de datos de clima tiene un paso temporal diario, los datos energéticos solo lo tienen mensual.

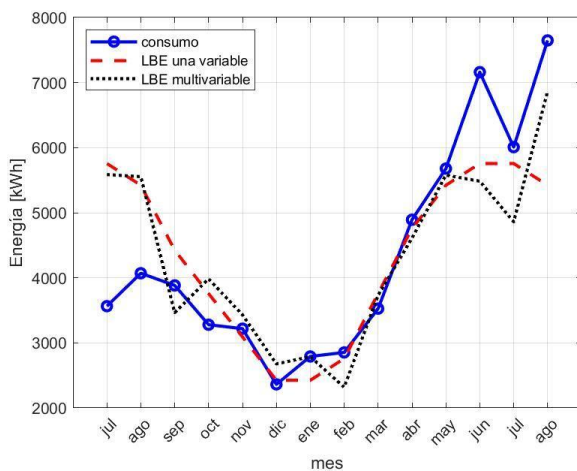


Figura 4. Consumo energético y línea base del Campus Pucón.

Fuente: elaboración propia

Entonces, el método LM presenta los coeficientes de determinación más altos, por lo que se recomienda utilizar este método de forma comparativa al momento de realizar ya sean estimaciones de consumo energético eléctrico y/o análisis de efectividad de MME. Se sugiere siempre considerar el incremento en la base de datos de años adicionales y en lo posible un remarcador eléctrico que permita datos con detalle de consumo diario y mantener una separación sectorial en el estudio.

3.2. Índices de Desempeño Energético

Para desarrollar y analizar los Índices de Desempeño Energético (IDEs), se presentan en la Fig. 5 los consumos mensuales tanto de energía eléctrica como de GLP. Durante el periodo de estudio, estos consumos resultan en 60.932 kWh/año, correspondiente al 37% del consumo total de CP, y 98.743 kWh/año, correspondiente al 63% del consumo total de CP, respectivamente. Además, se realiza una compra única de biomasa (leña) con un consumo equivalente de 5.617 kWh/año.

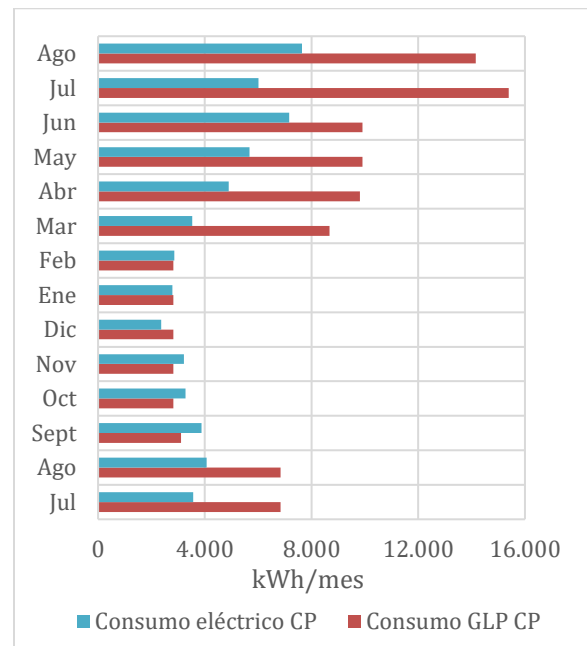


Figura 5. Consumos energéticos principales Campus Pucón.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan y analizan los resultados de los IDEs correspondientes al CP. La Fig. 6 muestra los resultados para el IDE1, para cada cara,

individualizando sus consumos eléctricos total anual sobre superficie.

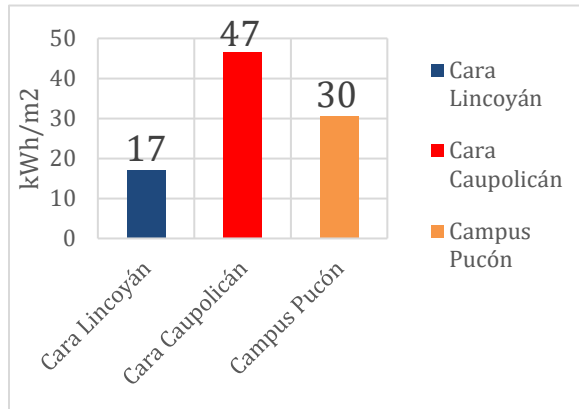


Figura 6. IDE1 eléctrico Campus Pucón.

Fuente: elaboración propia.

La Fig. 6 indica una diferencia significativa en el consumo eléctrico específico entre los dos sectores del CP, influenciada por una adaptación de la infraestructura para la transferencia de consumo de aprox. 272 m² (ver Fig. 2) de CL hacia CC. Esto debido a las limitantes físicas de CL y la instalación de equipamiento de potencia nominal alta. De igual forma, las tarifas eléctricas diferenciadas entre ambas caras afectan los costos totales y la eficiencia energética de cada sector. Por lo tanto, con una estandarización estructural y tarifaria esta brecha se reduciría.

Con respecto al IDE2, la Fig. 7 muestra el total anual de emisiones de la institución por medio de los energéticos de electricidad, GLP, biomasa y diésel. Este último es un combustible de emergencia que no tiene impacto durante el periodo de estudio. Mediante este indicador se puede notar que la biomasa, a pesar de ser una fuente renovable, presenta un desafío significativo debido a su alto factor de emisión de CO₂ reflejándose en los datos presentados, donde esta representa un 80% de las emisiones para el CP y siendo uno de los energéticos menos utilizados en el Campus. Para reducir las emisiones totales del CP, es esencial implementar una combinación de MMEE, sustitución por alternativas más limpias, y una mezcla de fuentes energéticas. La adopción de energías renovables, tecnologías eficientes, mantenciones periódicas y programas de concienciación pueden

contribuir sustancialmente a un campus más sostenible y con menores emisiones de carbono.

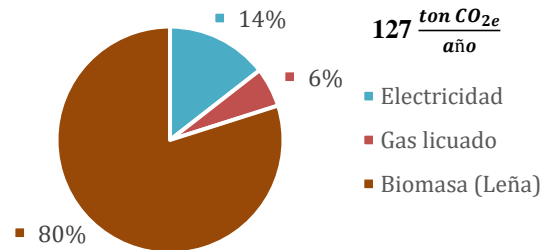


Figura 7. IDE2 Emisiones CO₂e Campus Pucón.

Fuente: elaboración propia.

Con respecto al indicador de ocupación, para un total estimado de 366 personas asistentes al CP, se obtiene la Fig. 8 donde se muestra la energía consumida per cápita en el periodo de estudio.

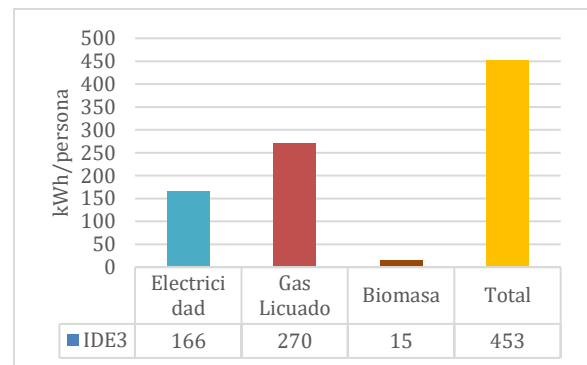


Figura 8. IDE3 Campus Pucón, consumo energético para rango total de personas.

Fuente: elaboración propia.

Este elevado consumo de GLP presentado en la Fig. 8 puede deberse a varios factores, como el uso intensivo en calefacción y cocina, donde su costo relativamente bajo y disponibilidad lo hacen una opción accesible. Además, la infraestructura del campus no está optimizada para la eficiencia energética (aislación térmica), contribuyendo así a un mayor consumo.

El alto consumo per cápita podría indicar una tendencia hacia el uso intensivo de recursos energéticos por individuo, posiblemente debido a hábitos de consumo poco eficientes o falta de concienciación sobre el ahorro energético. También

podría reflejar una baja densidad de ocupación en algunas áreas del campus, donde la infraestructura y los sistemas de calefacción y electricidad no están optimizados para el número real de usuarios. Además, el aumento en el número de dispositivos electrónicos personales y la necesidad de climatización individualizada podrían contribuir al aumento del consumo energético por persona.

3.3 Medidas de mejora de eficiencia energética

Se presenta una lista inicial de propuestas de MMEE para el CP (Tabla 2), donde se señalan respectivamente los tipos de MMEE.

Tabla 2. Lista de Medidas de Mejora de Eficiencia Energética Propuestas.

N°	Propuesta	Tipo de MMEE
1	Recambio luminarias	Adición componentes/ Recambio tecnológico
2	Implementar paneles fotovoltaicos	Adición componentes/mejora de diseño o proceso
3	MMEE de Gestión	Hábitos o Gestión operacional/adición componentes
4	Cambio de mamparas a termopaneles	Recambio tecnológico
5	Compra de lector de potencia para UPS y equipos de lectura	Adición componentes
6	Cambio de infografía tela PVC por malla mesh	Reemplazo/adición componentes
7	Actualización estufas murales	Recambio tecnológico

Fuente: elaboración propia.

Para discriminar opciones dentro de las MMEE (Tabla 2) se expone la información de equipos eléctricos para el CP. Esta se desglosa en 482 equipos eléctricos en

CL, equivalentes a 54 kW de potencia conectada, y 559 equipos eléctricos en CC, equivalentes a 52 kW de potencia conectada. Las Figs. 9 y 10 muestran el diagrama de Pareto [29] por sistemas asociados de consumo eléctrico para los equipos caracterizados [29]. Consecuentemente, se obtienen los sistemas que tienen mayor incidencia en el consumo energético teórico (potencia instalada por tiempo de uso). Para el caso de la CL se destacan en orden consumo los sistemas de cocina, iluminación y equipos de oficina; mientras que para la CC los equipos de oficina toman mayor relevancia, manteniendo la iluminación y en tercera posición los equipos de aire acondicionado.

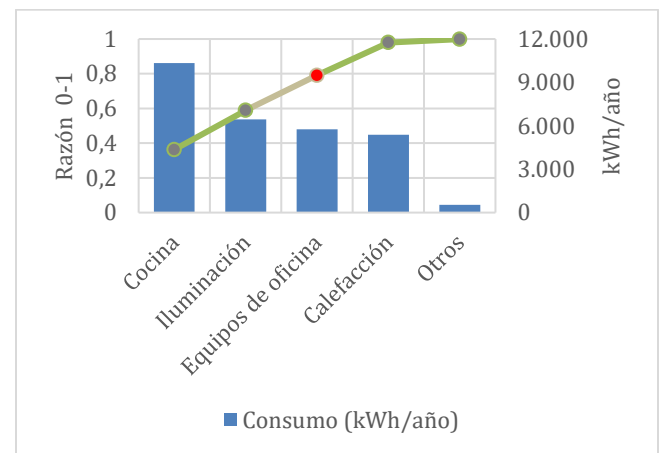


Figura 9. Diagrama Pareto subsistemas Cara Lincoyán kWh/año.

Fuente: elaboración propia.

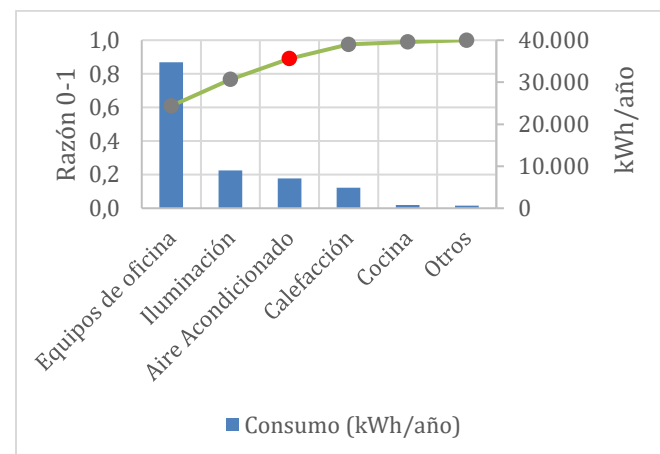


Figura 10. Diagrama Pareto subsistemas Cara Caupolicán kWh/año.

Fuente: elaboración propia.

En base a los criterios de selección de las MMEE propuestas y los resultados obtenidos de los diagramas de Pareto, se destaca la necesidad de enfocar las medidas tanto hacia el área de iluminación como equipos HVAC. Teniendo en cuenta la disponibilidad de información para un desarrollo técnico/económico a nivel de prefactibilidad, se opta por la selección de las siguientes medidas: MMEE1, cambio de luminarias actuales por iluminación LED; y MMEE2, implementación de paneles fotovoltaicos. Estas se desarrollan a continuación.

Para MMEE1 se estima la situación actual, en base a recopilación de información del CP, i.e., factor de carga unitaria, cantidad de luminarias, promedio de uso hrs/año, consumo kWh/año y costos CLP/año. Luego, se calcula el ahorro anual reemplazando los tubos fluorescentes de 36W, por tubos LED de 16W. Finalmente, se presentan opciones de cotización en el mercado nacional, para obtener el periodo de retorno de inversión (PRI) de la MMEE propuesta.

Tabla 3. Comparativa situación actual y recambio de luminarias en el Campus Pucón.

MMEE	Situación actual	Recambio luminarias
Luminaria	Tubo fluorescente 36W	Tubo LED 16W
Potencia instalada kW	29 (13 CC, 16 CL)	13 (6 CC, 7 CL)
Consumo energía kWh/año	29.987	15.134
Costo anual CLP	5.673.337	3.184.643

Fuente: elaboración propia.

De la Tabla 3, se evidencia la necesidad de normalización del sobreconsumo eléctrico presente en la CL, donde por parte de la compañía eléctrica, para tarifas BT1, se recomienda no sobrepasar una potencia instalada de 10kW, la cual, antes de la MMEE 1 era de 16 kW y una vez calculado este recambio de luminarias, se reduce a 7 kW de potencia instalada en

luminarias, normalizando el sobreconsumo generado por este tipo de equipos.

Tabla 4. Costos de recambio de luminarias.

	Cotización 1	Cotización 2
Tipo	Tubos T8 Led 16 W	Tubos T8 Led 16 W
Costo CLP	1.956.548	4.354.410
PRI años	0,7	1,3

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4 muestra dos opciones estándar del mercado chileno. Ambas opciones muestran un PRI relativamente bajo por lo que se sugiere como una opción atractiva a la institución, dado que además de presentar una reducción económica, va en concordancia con la sugerencia del empalme de la CL.

Para la MMEE2, aunque la implementación de estos paneles no es una MMEE por sí misma, actúa como una herramienta directa al aprovechar una fuente de energía renovable, reduciendo la dependencia de recursos no renovables y contribuyendo a la eficiencia del sistema energético. Para implementar esta propuesta, se realiza un cálculo estimado de un arreglo fotovoltaico en base a la superficie de techumbre del CP utilizando la metodología de Soto, S (2023) [39], y se cotiza un kit fotovoltaico de potencia similar [40] en el mercado para obtener su PRI.

Tabla 5. Datos técnicos y costos de implementación fotovoltaica.

N° de paneles	20 de 500 Wp
Generación total diaria kWh	41
Generación total anual kWh/año	15.000
Ahorro Campus Pucón %	25
Inversión CLP	10.700.000
PRI años	3,37

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 5 se presenta el kit solar de 10 kW para el CP. Inicialmente, para este arreglo fotovoltaico, se recomienda una conexión bidireccional, con conexiones independientes para cada cara del CP en base a las tarifas contratadas diferidas. En caso ideal, se sugiere regularizar este sistema y trabajar con una tarifa común en el CP, para implementar a nivel de factibilidad, un arreglo fotovoltaico que se ajuste mejor al edificio.

4. Conclusiones

Se realiza un estudio energético al Campus Pucón de la Universidad de la Frontera donde se desagregan las diferentes caras de la institución. Se considera información recopilada a través de trabajo en terreno y datos tarifarios de lo que se concluye:

- Los modelos predictivos de línea base energética utilizando regresiones lineales de una y dos variables muestran un buen ajuste cualitativo con el consumo real. Se recomienda el uso multivariable para análisis futuro y se sugiere extender la cantidad de datos a través de un menor espacio temporal y durante más periodos de tiempo.

- El análisis de los indicadores de desempeño energético evidencia la asimetría del Campus en sus caras, destaca a energéticos de climatización como agente de alto impacto ambiental un alto consumo per cápita de la institución. En términos generales, el Campus Pucón tiene un consumo energético total de 166 MWh/año, con un 37% correspondiente al área eléctrica y un 63% a la térmica, lo que evidencia un alto potencial de mejora en la eficiencia energética de las instalaciones.

- Las medidas de mejora de eficiencia energética propuestas, como el recambio de luminarias por tecnología LED y la implementación de paneles fotovoltaicos, muestran periodos de retorno de inversión atractivos de en torno a 1 y 3 años respectivamente, lo que respalda su viabilidad técnica/económica de prefactibilidad para ser implementadas en el Campus.

Referencias

- [1] IPCC (2013), Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–30, DOI:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [2] IEA (2021). Key World Energy Statistics 2021. URL:<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>.
- [3] Gallachóir, B. Ó., Keane, M., Morrissey, E., & O'Donnell, J. (2007). Using indicators to profile energy consumption and to inform energy policy in a university—A case study in Ireland. *Energy and Buildings*, 39(8), 913-922. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.11.005
- [4] Escobedo, A., Briceño, S., Juárez, H., Castillo, D., Imaz, M., & Sheinbaum, C. (2014). Energy consumption and GHG emission scenarios of a university campus in Mexico. *Energy for sustainable development*, 18, 49-57. DOI: 10.1016/j.esd.2013.10.005
- [5] Lourenço, P., Pinheiro, M. D., & Heitor, T. (2014). From indicators to strategies: Key Performance Strategies for sustainable energy use in Portuguese school buildings. *Energy and Buildings*, 85, 212-224. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.09.025
- [6] Pappi, I. N., Paterakis, N. G., Catalão, J. P., Panapakidis, I., & Papagiannis, G. (2015, September). Analysis of the energy usage in university buildings: XVI CIBIM – 2024, Concepción The case of Aristotle University campus. In 2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/AUPEC.2015.7324856
- [7] Vázquez, L., Iriarte, A., Almeida, M., & Villalobos, P. (2015). Evaluation of greenhouse gas emissions and proposals for their reduction at a university campus in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 108, 924-930.
- [8] Gul, M. S., & Patidar, S. (2015). Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building. *Energy and Buildings*, 87, 155-165. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.027
- [9] Han, Y., Zhou, X., & Luo, R. (2015). Analysis on campus energy consumption and energy saving measures in cold

region of China. *Procedia Engineering*, 121, 801-808. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.09.033

[10] Amber, K. P., Aslam, M. W., Mahmood, A., Kousar, A., Younis, M. Y., Akbar, B., Chaudhary, G. Q., & Hussain, S. K. (2017). Energy consumption forecasting for university sector buildings. *Energies*, 10(10), 1579. DOI: 10.3390/en10101579

[11] Popoola, S. I., Atayero, A. A., Okanlawon, T. T., Omopariola, B. I., & Takpor, O. A. (2018). Smart campus: data on energy consumption in an ICT-driven university. *Data in brief*, 16, 780-793. DOI: 10.1016/j.dib.2017.11.091

[12] Lo-Iacono-Ferreira, V. G., Capuz-Rizo, S. F., & Torregrosa-López, J. I. (2018). Key Performance Indicators to optimize the environmental performance of Higher Education Institutions with environmental management system—A case study of Universitat Politècnica de València. *Journal of Cleaner Production*, 178, 846-865. URL: <http://hdl.handle.net/10251/124276>

[13] Batlle, E. A. O., Palacio, J. C. E., Lora, E. E. S., Reyes, A. M. M., Moreno, M. M., & Morejón, M. B. (2020). A methodology to estimate baseline energy use and quantify savings in electrical energy consumption in higher education institution buildings: Case study, Federal University of Itajubá (UNIFEI). *Journal of Cleaner Production*, 244, 118551. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118551

[14] Hong, W. H., Kim, J. Y., Lee, C. M., & Jeon, G. Y. (2011). Energy consumption and the power saving potential of a University in Korea: using a field survey. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 10(2), 445-452. DOI: 10.3130/jaabe.10.445

[15] Crețu, M., Czumbil, L., Bărgăuan, B., Ceclan, A., Berciu, A., Polycarpou, A., Rizzo, R., & Micu, D. D. (2020). Modelling and evaluation of the baseline energy consumption and the key performance indicators in technical university of Cluj-Napoca buildings within a demand response programme: A case study. *IET Renewable Power Generation*, 14(15), 2864-2875. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0096

[16] Venegas, T. P., Espinosa, B. A., Cataño, F. A., & Vasco, D. A. (2023). Impact assessment of implementing several retrofitting strategies on the air-conditioning energy demand of an existing university office building in Santiago, Chile. *Infrastructures*, 8(4), 80. DOI: 10.3390/infrastructures8040080

[17] United Nations. General Assembly. (2015). Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015.

Washington: United Nations. URL: <https://undocs.org/en/A/RES/70/1>

[19] Ministerio de Energía, Chile (2021). Ley 21305 sobre eficiencia energética. URL: <https://bcn.cl/2nn0z>

[20] Ministerio del Medio Ambiente Chile (2023). Estrategia climática de largo plazo de Chile: camino a la carbono neutralidad y resiliencia a más tardar al 2050. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12650/73008>

[21] Ministerio de Energía, Chile (2022). Plan nacional de eficiencia energética 2022-2026. URL: <https://energia.gob.cl/ley-ee>

[22] Agencia de sustentabilidad y cambio climático (2021). Acuerdo de producción limpia II, educación superior sustentable. URL: <https://www.redcampussustentable.cl/apl/>

[23] Verichev, K., & Carpio, M. (2018). Climatic zoning for building construction in a temperate climate of Chile. *Sustainable cities and society*, 40, 352-364. DOI: 10.1016/j.scs.2018.04.020

[24] Vicerrectoría de pregrado y vicerrectoría de investigación y postgrado, Universidad de la Frontera, Chile (2023). Modelo educativo UFRO. URL: <https://modeloeducativo.ufro.cl/me-ufro/>

[25] Red Compromiso con el Desarrollo Sustentable del Consorcio de Universidades del Estado de Chile (2024). Declaración de Compromiso por la Sustentabilidad. URL: https://sustentable.ufro.cl/wp-content/uploads/2024/03/Declaracion-Compromiso-por-la-Sustentabilidad_23_01.pdf

[26] Gray, C. (2016). Los archivos de la memoria: la historia no contada de Pucón. ISBN: 978-956-01-0240-9

[27] Soc. Bórquez y Burr Ltda. (2014). Actualización Plan Regulador Comunal de Pucón. URL: https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/04_Anteproyecto_PRC_Pucon-2.pdf.pdf

[28] Ministerio de energía, Chile (2017). Fija fórmulas tarifarias aplicables a los suministros sujetos a precios regulados que se señalan, efectuados por las empresas concesionarias de distribución que se indican. URL: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2015/07/11T-2016-VAD-2016-2020.pdf>

[29] Balderrama, R., Gopel, S., Lobo, J. M., Meneses, P., & Perez, K. (2019). Guía Metodológica de Auditoría

Energética en Edificación (1.a ed.). Agencia de Sostenibilidad Energética.
<https://www.programaenergias.cl/>

[30] Bascur, A. (2024). “Propuestas de mejoras de uso eficiente de energía en Campus Pucón de la Universidad de la Frontera”. Trabajo para optar al título de Ingeniería Civil Mecánica. Universidad de La Frontera, Temuco.
<https://drive.google.com/drive/folders/1qo1Fsa48nI1rYgs1SaJ4CTrvCYQcJTrY>

[31] Rubilar, F. (2023). Reporte de Sustentabilidad, UFRO 2022. Recuperado el 11 de junio de 2024, de <https://onedrive.live.com/?authkey=%21AJleOpsVcofAino&id=522D96F169673358%2117806&cid=522D96F169673358&parId=root&parQt=sharedby&o=OneUp>

[32] DGAC Chile. (s. f.). *Dirección Meteorológica de Chile*. Meteochile. Recuperado el 10 de junio de 2024, de <https://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>

[33] Castrillón Mendoza, R., Monteagudo Yanes, J. P., Borroto Nordelo, A., & Quispe Oqueña, E. (2015). Línea de Base Energética en la implementación de la norma ISO 50001. Estudios de casos. *El Hombre y la Máquina*, 45, 137-143. <https://www.redalyc.org/pdf/478/47843368016.pdf>

[34] Farias, F. et al. (2016). SEGUNDO INFORME BIENAL DE ACTUALIZACIÓN DE CHILE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO (1.a ed.). https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/04/2016_2BUR_sp_CL.pdf

[35] Poch Ambiental & Deuman. (2008). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/recurso_1-1.pdf

[36] Hinojosa, L., & Holguin, J. L. (2014). Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos. Departamento de Educación Ambiental y Participación Ciudadana. https://old.acee.cl/576/articles_58688_doc_pdf.pdf

[37] A. Field, *ISO 50001 : A Strategic Guide to Establishing an Energy Management System*, Null., vol. null, no. null. in null, vol. null. Ely: ITGP, 2019. [Online]. Available: <https://researchs.ufro.elogim.com/linkprocessor/plink?id=c3217ccb-cac9-3888-8770-c8ffa3f3482c>

[38] Tubo LED Philips EcoFit T8 16W 740 luz neutra 120CM. (s. f.). Tecno Iluminación. Recuperado XVI CIBIM – 2024, Concepción 14 el 23 de junio de 2024, de

<https://tecnoiluminacion.cl/productos/538tuboledphilipsecofitt816w740luzneutra120cmhtmlhtml>

[39] Soto, S (2023). “Propuesta para una instalación de sistemas fotovoltaicos en edificios de la Universidad de la Frontera por medio de estudios de factibilidad técnico económica”. Trabajo para optar al título de Ingeniería Civil Ambiental. Universidad de La Frontera, Temuco.

[40] Ingeniería y Soporte Solar. (2024, 8 enero). Solartek Chile - Ingeniería y soporte solar - Ingeniería y Soporte Solar. Recuperado el 23 de junio de 2024, de <https://www.solartek.cl/>.