



# Optimización multi-objetivo de estrategias de eficiencia energética en un campamento minero existente en la Cordillera de los Andes.

## Multi-objective optimization of energy efficiency measures in an existing mining camp in the Andes mountain.

### Annelore Dietz Muñoz

Filiación: Pontificia Universidad Católica de Chile  
Dirección: Av. Providencia 1459, departamento 403, Providencia. 7500564  
Correo: [aidietz@uc.cl](mailto:aidietz@uc.cl)

### Sergio Vera Araya

Filiación: Pontificia Universidad Católica de Chile  
Dirección: Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul. 7820436  
Correo: [svera@ing.puc.cl](mailto:svera@ing.puc.cl)

**Manuscript Code:** 037

**Date of Acceptance/Reception:** 06.07.2018/31.05.2018

### Resumen

La industria de la minería es uno de los mayores consumidores de energía eléctrica, consumiendo un 32% del total de producción eléctrica de Chile. Uno de los desafíos actuales de las instituciones mineras es proveer una buena calidad de vida a sus trabajadores y minimizar el consumo de energía de sus campamentos mineros. Reportes de sustentabilidad de las compañías mineras muestran que el consumo promedio de los campamentos mineros varía entre 350 y 500 kWh/m<sup>2</sup>. El presente trabajo tiene como objetivo optimizar el diseño de la envolvente de un campamento minero para minimizar el consumo total de energía eléctrica y, a la vez, mejorando la calidad de ambiente interior. Para esto, se llevó a cabo una optimización multi-objetivo mediante la herramienta de optimización GenOpt acoplado con EnergyPlus, donde se optimizó parámetros de la envolvente, orientación, iluminación, sistema de climatización e incorporando una restricción de sobrecalentamiento. Se tomaron en consideración las condiciones de diseño, geográficas y climáticas de los campamentos mineros que influyen en el desempeño energético. Para esto, el estudio se basa en un campamento minero real, Quebrada Blanca 2, el cual posee un área total de 30.000 m<sup>2</sup>, se encuentra a 4.400 msnm en la Cordillera de los Andes y está construido de módulos prefabricados de madera. Los principales resultados muestran que las estrategias de eficiencia energética optimizadas con la restricción de sobrecalentamiento alcanzan a reducir el consumo base del campamento en un 65.8% y mejorar la calidad de ambiente interior evitando el sobrecalentamiento. La optimización realizada permite descubrir un largo conjunto de estrategias aplicables con efecto directo en el consumo energético de los campamentos y calidad de ambiente interior, las cuales dan flexibilidad en el diseño, dependiendo de los objetivos y resultados deseados. Estos conjuntos de estrategias pueden ser aplicadas tanto en nuevos proyectos como en proyectos de rehabilitación.

**Palabras claves:** Simulación energética de edificios, optimización multi-objetivo, confort térmico, campamentos mineros, módulos prefabricados de madera

### Abstract

The mining industry is one of the largest energy consumers in Chile with 32% of the total electricity consumption of the whole country. One of the current challenges of the mining institutions is to provide a good life quality to their workers and to minimize the energy consumption of the mining camps. Sustainable reports of mining companies show that electric energy consumption of mining camps vary between 350 and 500 kWh/m<sup>2</sup> year. This work aims to optimize the building envelope to minimize the mining camp energy consumption and to improve the Indoor Environmental Quality (IEQ). A multi-objective optimization is carried out using GenOpt as the optimization engine coupled with EnergyPlus. The main parameters that are evaluated correspond to roofs, walls and floors insulation, U-value and SHGC of windows, window area, orientation, HVAC system, and lighting power density including an overheating constraint. The design, geographic and climatic conditions of the mining camps that influence energy performance were taken into consideration. To do this, a real mining camp, Quebrada Blanca 2, is used as case study. Quebrada Blanca 2 has a built area of 30.000 m<sup>2</sup>, is located at 4.400 m.a.s.l. in the Andes Mountain and is built of timber prefabricated lightweight modules. The main results show that the optimized energy efficiency strategies with the overheating constraint can reduce up to 65.8% the base-case mining camp energy consumption and improve the indoor environmental quality avoiding overheating. These optimizations allow us to discover a long set of applicable strategies with direct effect on the energy consumption of the mining camp and the IEQ, which give flexibility in the design, depending on the objectives and desired results.

**Keywords:** Building energy simulation, multi-objective optimization, thermal comfort, mining camps, timber prefabricated modules

Hoy en día es imperante mejorar la calidad de vida de los trabajadores y disminuir el consumo energético en la minería. El sector de la minería en Chile es responsable del 32% del consumo total de electricidad, el cual se pronostica que crecerá en un 53% entre el 2014 y 2026 (COCHILCO, 2016; Minsiterio de Energía, 2015). Esto se debe principalmente al alto uso de energía eléctrica en las mineras generada principalmente por las centrales eléctricas de carbón y el uso de combustibles fósiles (Zúñiga, 2009). El 80% de los sitios mineros se encuentran en zonas remotas sobre los 3.000 msnm, lo que implica que requieran construir campamentos para poder alojar a los trabajadores. Los campamentos mineros deben tener casino, dormitorios, oficinas, lavandería, salas de estar, entre otros, lo que conlleva a que el tamaño de estos varíe entre los 6.500 y 95.000 m<sup>2</sup> para alojar entre 600 y 7.000 trabajadores (Correa3 Arquitectos Ltda, 2011). En este contexto, el consumo de los campamentos varía entre los 350 a 500 kWh/m<sup>2</sup> año. Las condiciones ambientales desérticas de altura presentes en esas localidades tienen características atmosféricas particulares, tales como baja humedad en el aire, reducción del oxígeno en 30%, aumento radiación ultravioleta en 30%, presión del aire disminuye en 30% y clima frío que generan dificultades físicas a los trabajadores. Esto, en conjunto con las largas jornadas laborales dificulta su calidad de vida (Departamento de Estudios de la Dirección del Trabajo., 2011; Dirección del Trabajo, 2010). El objetivo de este trabajo es optimizar el diseño de la envolvente de un campamento minero para minimizar el consumo total de energía eléctrica mejorando la calidad de ambiente interior.

## Estado del arte del problema

Para alcanzar buenos niveles de calidad de ambiente interior, el parámetro más importante es el confort térmico (Al horr et al., 2016). Los módulos prefabricados de madera suelen sufrir grandes fluctuaciones de temperatura en invierno y verano debido a la falta de masa térmica en su envolvente y su alto nivel de infiltraciones (Navarro, De Garcia, Solé, Castell, & Cabeza, 2012; Soares, Santos, Gervásio, Costa, & Simões da Silva, 2017). Por otro lado, al implementar estrategias de eficiencia energética para reducir el consumo energético de edificios, especialmente aumentar la hermeticidad de la envolvente y la aislación térmica, suele provocar sobrecalentamiento (Marin et al., 2016). Basado en esto, se requiere incluir el riesgo de sobrecalentamiento en la optimización para minimizar el riesgo de sobrecalentamiento, aumentar la calidad de ambiente interior y reducir el consumo energético de los campamentos mineros. Previas investigaciones han estudiado la optimización de estrategias de eficiencia energética en diferentes tipos de edificios. Shi et al. (2016) revisó el estado del arte de optimizaciones de estrategias de eficiencia energética basado en 116 casos de estudio donde, solo el 27% se realizó en casos de estudios reales y, la gran mayoría de los estudios se realiza en viviendas residenciales y comerciales. Los edificios no-residenciales y no-comerciales requieren ser estudiados debido a la heterogeneidad de actividades que se conducen a su interior (Buso & Corgnati, 2017). Esta particularidad de los edificios no-residenciales y no-comerciales hace interesante estudiar el efecto de las estrategias de eficiencia energética en su consumo energético total y en el sobrecalentamiento.

## Metodología

### Caso de estudio

Quebrada Blanca 2, un campamento minero real, ubicado a 4.400 msnm se utiliza como caso de estudio. Este campamento tiene capacidad para 1.700 personas y posee un área total de 30.317 m<sup>2</sup> distribuida en 15 bloques construidos por módulos prefabricados de madera. Trece de estos son edificios de dormitorios de 2 pisos, otro es el edificio central y el otro un edificio de oficinas, todos estos unidos por un pasillo techado. Los edificios de dormitorios se dividen en 4 tipos: los edificios de piezas simples son los de tipo A, los de tipo B son piezas dobles, y los edificios A-1 y B-1 son también piezas simples y dobles respetivamente, pero con menor cantidad de piezas por edificio (ver **Figura 1**)

Se utiliza EnergyPlus como software de simulación energética de edificios para estimar el consumo base del campamento. Para esto, se utilizaron los valores y características del campamento descritas en la **Tabla 1**. Todas las estrategias de eficiencia energética a optimizar se comparan con el consumo estimado del caso base.

El consumo del campamento minero es totalmente eléctrico, siendo el agua caliente sanitaria abastecida con termos eléctricos y las cocinas también son eléctricas. Bajo estas condiciones, el consumo del campamento se compone por el consumo asociado a 4 parámetros: Calefacción, iluminación, agua caliente sanitaria y equipos eléctricos. Las zonas calefaccionadas son las oficinas y los dormitorios mediante calefactores eléctricos.

Figura 1. Planta Quebrada Blanca 2 (Tecnofast, 2012)

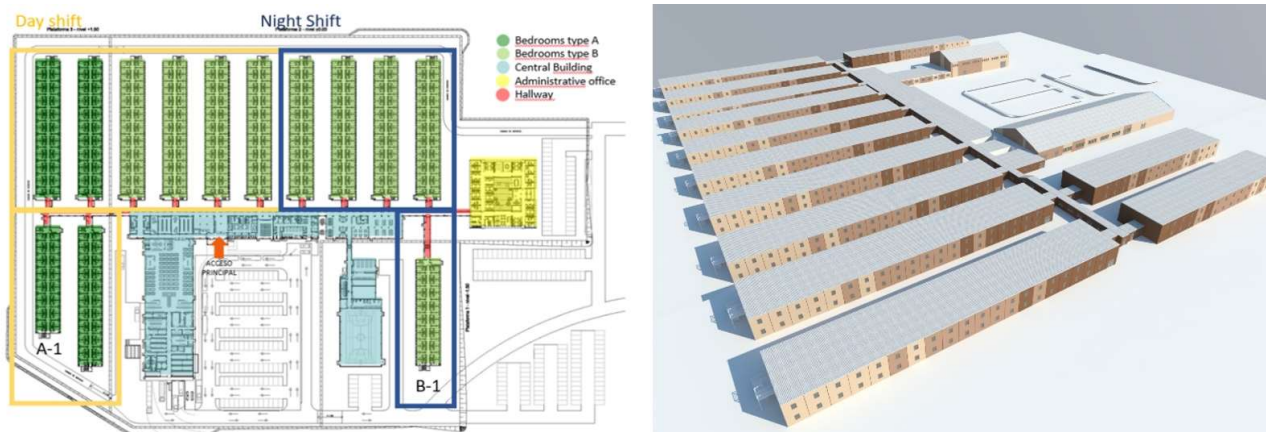


Tabla 1. Características simuladas del campamento minero

|                                   |                 |   |                     |
|-----------------------------------|-----------------|---|---------------------|
| <b>Thermal resistances values</b> |                 |   |                     |
| Dining room and Gymnasium         | External Wall   | Superwall (100 mm polyurethane)<br>U-value= 0.19 W/m <sup>2</sup> K                                 |                     |
|                                   | Roof            | Glamet techmet (100 mm Polyurethane)<br>U-value= 0.19 W/m <sup>2</sup> K                            |                     |
| All others                        | Ground Floor    | 100 mm concrete floor. U-value= 0.06 W/m <sup>2</sup> K   |                     |
|                                   | External Wall   | (11 mm Wood composite, 140 mm Mineral wool; 15 mm gypsum board)<br>U-value= 0.29 W/m <sup>2</sup> K |                     |
|                                   | Roof            | (1.2 mm PVC layer; 15 mm OSB layer; 140 mm Mineral wool) U-value = 0.3 W/m <sup>2</sup> K           |                     |
|                                   | Ground Floor    | (9.5 OSB layer; 140 mm Mineral wool; 16 mm plywood)<br>U-value = 0.28 W/m <sup>2</sup> K            |                     |
| <b>Thermal mass</b>               | None            |   |                     |
| <b>Window type</b>                | Aluminum        | Double glazing window thickness of 6 mm and an air gap of 6 mm (SGHC = 0.7)                         |                     |
|                                   | Window          | U-value = 0.32 W/m <sup>2</sup> K   |                     |
| <b>Occupants</b>                  | 1700 workers:   | Bedrooms day shift occupied from 19:30-7:30<br>Bedrooms night shift occupied from 7:30-19:30        |                     |
|                                   |                 | Offices occupied from 7:30-19:30<br>Dining room occupied from 6:00-9:00; 12:00-15:30; 18:00-21:00   |                     |
| <b>Setpoint temperatures</b>      | Bedrooms        | Kitchen occupied from 5:30-21:30<br>Heating setpoint: 20°C  |                     |
|                                   | Offices         | Heating setpoint: 20°C, Cooling Setpoint: 24°C*   |                     |
| <b>DHW</b>                        | Bedrooms type A | 3600 l;   | Bedrooms A-1 3000 l |
|                                   | Bedrooms type B | 7200 l;   | Bedrooms B-1 5400 l |
|                                   | Kitchen         | 120 l   |                     |
|                                   | Gym bathrooms   | 800 l   |                     |
| <b>Infiltration rate</b>          | 2 ACH           |   |                     |

## Metodología de optimización

Para mejorar la calidad de ambiente interior y disminuir el consumo energético se definió un conjunto de parámetros de diseño a optimizar en base a diferentes estrategias de diseño eficiente existentes. Estas se pueden observar en la Tabla 2. Estas estrategias apuntan a mejorar la envolvente térmica del edificio, reduciendo de esta manera las cargas asociadas en calefacción y a mejorar los equipos de iluminación para también reducir este consumo.

Las estrategias de diseño eficientes presentes en la Tabla 2, se optimizaron en dos casos diferentes, los cuales se diferencian en el sistema de climatización. El caso I se optimizó con el sistema de clima existente en el caso base que se compone de calefactores eléctricos en las habitaciones y oficinas. El caso II se evaluó implementando un sistema eficiente de calefacción compuesto por bombas de calor y vigas frías en los mismos edificios mencionados anteriormente. Este sistema de calefacción tiene la opción de free-cooling, la cual consiste en aprovechar las bajas

temperaturas exteriores para proporcionar enfriamiento y ventilación con bajo consumo energético asociado. La opción de enfriamiento se considera solo en las oficinas.

Tabla 2. Parámetros de diseño a optimizar

| Variable               | Units              | Initial   | Min. | Max.  | Steps | Description                            |
|------------------------|--------------------|-----------|------|-------|-------|--|
| azimuth                | Grados             | -139      | -180 | 180   | 45    | Building orientation                   |
| WindowU                | W/m <sup>2</sup> K | 3         | 1.5  | 3     | 0.5   | U-value                                |
| WindowSHGC             |                    | 0.7       | 0.4  | 0.7   | 0.1   | Solar heat gain coefficient            |
| InsulationConductivity | W/mK               | 0.045     | 0.02 | 0.045 | 0.005 | Walls conductivity                     |
| InsultionThickness     | m                  | 0.14      | 0.1  | 0.16  | 0.01  | Insulation thickness                   |
| Lighting               |                    | Base-case |      |       | 3     | Base-case, LED, LED with motion sensor |
| ACH                    | ACH                | 2         | 0.25 | 2     |       | Infiltrations. ACH= 2; 1; 0.5, 0.25    |
| DeltaNE                | m                  | 0         | -0.5 | 0.5   | 0.25  | High variation window NE bedrooms      |
| DeltaSW                | m                  | 0         | -0.5 | 0.5   | 0.25  | High variation window SO bedrooms      |
| DeltayOffice           | m                  | 0         | 0    | 1     | 0.5   | High variation window office           |

Para llevar a cabo la optimización se tuvo que integrar el software de simulación energética (EnergyPlus) con el software de optimización GenOpt (Asadi, da Silva, Antunes, & Dias, 2012). GenOpt es un motor de optimización que permite optimizar multivariantes en base a la minimización de una función de costo. En este caso, la función a minimizar es el consumo energético del campamento minero, que se compone por equipos eléctricos, agua caliente sanitaria, sistema de climatización e iluminación (Ecuación 1). Para lograr minimizar el consumo energético y a la vez mejorar la calidad de ambiente interior, el sobrecalentamiento se incluye como otro elemento de la función objetivo, como restricción por penalización. Es decir, este factor adquiere un valor muy grande cuando alguna zona se encuentra con sobrecalentamiento. De esta manera, penaliza ese conjunto de parámetros indicando que no es óptimo dado que se genera sobrecalentamiento y el algoritmo de optimización continúa evaluando nuevas soluciones cercanas a los mínimos que va alcanzando.

$$\min_{y \in Y} f(x)$$

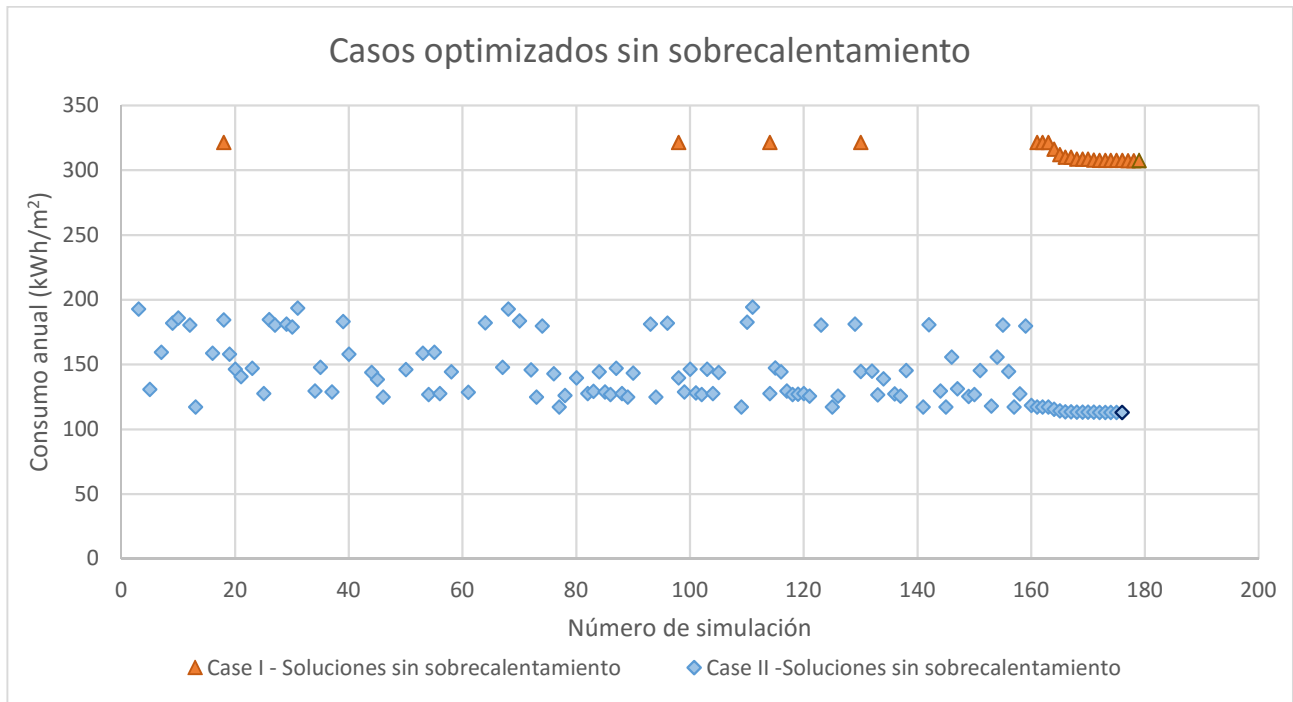
Ecuación 1.  $f(x) = \sum(\text{ElectricEquipment} + \text{DHW} + \text{HVAC} + \text{Lighting} + \text{Overheatin})$

## Resultados

El consumo estimado del caso base fue de 330 kWh/m<sup>2</sup> año, del cual el 67% corresponde a la energía requerida para calefacción, 20% a los equipos eléctricos, 7% a agua caliente sanitaria y 6% a iluminación. El caso base presentó sobrecalentamiento en las oficinas, debido a las altas cargas internas de esta zona.

Los resultados obtenidos de la optimización del caso I con calefactores eléctricos como sistema de climatización solo permitió reducir en un 6.9% (a 307.25 kWh/m<sup>2</sup> año) el consumo del caso base sin presentar sobrecalentamiento. El óptimo fue alcanzado tras 180 simulaciones, donde se evaluaron distintas combinaciones de parámetros que permitían reducir el consumo energético y no producían sobrecalentamiento en ninguna zona. De los 180 casos evaluados, 157 presentaron sobrecalentamiento. Los casos que cumplieron ambos objetivos están representados por triángulos naranjos en la Figura 2. Como se puede observar, la variabilidad existente entre las soluciones que no presentaron sobrecalentamiento es mínima, lo que indica que mantener el sistema de climatización existente reduce la posibilidad de implementar medidas de eficiencia energética que reduzcan el consumo energético del campamento y mejoren la calidad del ambiente interior y confort térmico.

En cuanto a los resultados del Caso II, con el sistema eficiente de calefacción, se logró alcanzar un óptimo de consumo energético anual de 112.9 kWh/m<sup>2</sup> año. Este valor equivale a una reducción del 65.8% del consumo del caso base. El 58% del óptimo de consumo energético alcanzado corresponde al consumo de equipos eléctricos, el 20% corresponde a agua caliente sanitaria, el 15% a calefacción y un 7% a iluminación. Estos dos últimos factores eran directamente afectados por los parámetros de eficiencia energética optimizados. El proceso de optimización se completó en 260 optimizaciones, de las cuales 177 permitían reducir el consumo energético y mantener la calidad de ambiente interior (Ver Figura 2).



**Figura 2.** Resultados obtenidos en la optimización del Caso I y Caso II que no presentaron sobrecalentamiento en ninguna zona térmica

En la **Figura 2**, se puede observar que la variabilidad de consumo energético alcanzado entre las opciones que cumplen ambos objetivos en el Caso II va entre los 194.32 kWh/m<sup>2</sup> año a el óptimo de 112.9 kWh/m<sup>2</sup> año. El conjunto de estrategias de eficiencia energética asociados a estos niveles de consumo permite conocer la gran variabilidad de conjuntos de parámetros implementables que consiguen reducir considerablemente el consumo energético y aumentar la calidad de ambiente interior de todo el campamento minero. De esta manera, en la etapa de diseño se pueden considerar los conjuntos de parámetros que permitan obtener el consumo esperado y respondan de mejor manera a las restricciones propias de cada proyecto. Por ejemplo, la orientación de los campamentos mineros suele determinarse en base a las condiciones geométricas del lugar para que se requiera realizar el menor movimiento de tierra posible. Si este fuera un elemento crítico de diseño, se debería optar por el conjunto de variables de diseño que posea la orientación que permita conseguir ese objetivo.

Las estrategias de eficiencia energética que permiten alcanzar los óptimos del caso I y caso II se presentan en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Diseños óptimos de los 2 casos optimizados y el diseño del caso base

| Variable               | Description                         | Units   | Baseline | Case I  | Case II |
|------------------------|-------------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| Azimuth                | Building orientation                | Degrees | -139     | 108.5   | -147.4  |
| WindowU                | Thermal transmittance               | W/m2K   | 3        | 1.5     | 1.5     |
| WindowSHGC             | Solar Heat Gain Coefficient         |         | 0.7      | 0.51875 | 0.5     |
| InsulationConductivity | Walls conductivity                  | W/mK    | 0.045    | 0.02    | 0.02    |
| InsulationThickness    | Insulation thickness                | m       | 0.14     | 0.16    | 0.16    |
| Lighting               | Actual, LED, LED with motion sensor |         | Actual   | LEDsM   | LEDsM   |
| ACH                    | Infiltrations. ACH= 2; 1; 0.5, 0.25 | ACH     | 2        | 2       | 0.25    |
| DeltaNE                | High variation window NE bedrooms   | m       | 0        | 0.5     | -0.0625 |
| DeltaSW                | High variation window SO bedrooms   | m       | 0        | 0.5     | 0.25    |
| DeltaOffice            | High variation window office        | m       | 0        | 0.5     | 1       |

## Discusión y Conclusiones

Dos grandes desafíos de la minería en Chile son: minimizar el consumo de energía y mejorar la calidad de vida de sus trabajadores. Esta investigación tiene como objetivo optimizar el diseño de la envolvente de un campamento minero para minimizar el consumo total de energía eléctrica mejorando la calidad de ambiente interior. Esto se lleva a cabo mediante una optimización multi-objetivo implementada en la herramienta de optimización GenOpt acoplado con EnergyPlus. Se definieron estrategias de eficiencia energética a optimizar, tales como mejoras en el desempeño térmico de la envolvente, diferentes orientaciones y distintas fuentes de iluminación. Esto se evaluó con dos sistemas de climatización e incorporando una restricción de sobrecalentamiento que evita que se elija una opción que genere sobrecalentamiento en el campamento minero.

Con los resultados obtenidos en la optimización del Caso I, se puede observar que las estrategias de eficiencia energética optimizadas aumentan el riesgo de sobrecalentamiento al interior del campamento minero, generando sobrecalentamiento en zonas donde no se veía este comportamiento en el caso base, como dormitorios, cocina, entre otras. Las soluciones alcanzadas que cumplen ambos objetivos logran reducir máximo en un 6.9% el consumo energético del caso base. Esto demuestra que si se mantiene el sistema de climatización no solo no se mejora la calidad de ambiente interior y confort de los trabajadores, sino que tampoco se puede alcanzar una minimización considerable del consumo energético del campamento minero.

Para lograr alcanzar un menor consumo energético del campamento con las estrategias de eficiencia energética definidas sin provocar sobrecalentamiento, se realiza la misma optimización del Caso I con un nuevo sistema de climatización en base a vigas frías y bombas de calor que es más eficiente y posee la opción de enfriamiento en oficinas. En este caso se logra reducir el consumo energético del caso base en un 65.8% sin sobrecalentamiento. Estos valores indican la relevancia del sistema de climatización en la implementación de medidas de eficiencia energética sin empeorar la calidad de ambiente interior.

El óptimo diseño del campamento que evita el sobrecalentamiento y disminuye el consumo energético, se alcanzó en el óptimo del caso II, mostrado en la Tabla 3. Estos valores en cuanto a rediseño del campamento se pueden alcanzar mediante el diseño de una envolvente con transmitancia térmica igual a  $0.125 \text{ W/m}^2\text{K}$ , incluyendo muros exteriores, cubierta y piso. Los vidrios deben poseer una transmitancia de  $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  y SHGC de 0.52, lo que se alcanza con ventanas doble low-e o ventanas dobles con argón. Las infiltraciones deben bajarse a 0.25 ACH en todo el edificio y utilizar luces LED con sensor de movimiento en todo el edificio. En cuanto al tamaño de las ventanas, se debe aumentar las ventanas en orientación noreste de los edificios de dormitorios en un 15% mientras que las ventanas de las oficinas y en orientación suroeste del edificio de dormitorios se deben reducir en un 33% y 67% respectivamente.

GenOpt, en conjunto con EnergyPlus son herramientas útiles tanto para realizar optimizaciones multivariadas en torno al desempeño energético de edificios e ingresar restricciones por penalización, como se hizo con el criterio de sobrecalentamiento. El proceso entrega las variables simuladas en cada caso del proceso de optimización, por lo que permite conocer la totalidad de conjuntos de variables que permiten reducir el consumo energético y no generar sobrecalentamiento en el campamento minero. Con estos datos, se puede evaluar en etapa de diseño cuales son las estrategias de eficiencia energética que responden mejor a cada proyecto. De esta manera, esta información es útil tanto para proyectos nuevos como para proyectos de rehabilitación. Sin embargo, en este último, las estrategias de eficiencia energética aplicables podrían variar.

Este trabajo se puede profundizar considerando otras estrategias de eficiencia energética que apunten a reducir el consumo de agua caliente sanitaria e implementar energías renovables que permitan abastecer parcial o totalmente el consumo reducido del campamento minero.

## Agradecimientos

El autor agradece a la empresa Tecnofast, que apoyo y proporcionó información para el desarrollo de este estudio y el apoyo a la investigación Proyecto CONICYT/FONDAP 15110020, Centro de Desarrollo Urbano Sostenible (CEDEUS).

- Al horr, Y., Arif, M., Kafaygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., & Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>
- Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>
- Buso, T., & Corgnati, S. P. (2017). A customized modelling approach for multi-functional buildings – Application to an Italian Reference Hotel. *Applied Energy*, 190, 1302–1315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.042>
- COCHILCO. (2016). Informe de actualización de emisiones de gases de efecto invernadero directos en la minería del cobre al año 2015.
- Correa3 Arquitectos Ltda. (2011). Alojamientos Mineros, 73.
- Departamento de Estudios de la Dirección del Trabajo. (2011). *Una aproximación a las condiciones de trabajo en la gran minería de altura. Cuaderno de investigación N°40*.
- Dirección del Trabajo. (2010). Riesgos en la minería de altura geográfica.
- Marin, P., Saffari, M., de Gracia, A., Zhu, X., Farid, M. M., Cabeza, L. F., & Ushak, S. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Buildings*, 129, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.007>
- Minsiterio de Energía. (2015). Balance Nacional de Energía 2015. *Dirección General de Planeación Energética Chile*, 159. [https://doi.org/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2015.pdf](https://doi.org/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177621/Balance_Nacional_de_Energ_a_2015.pdf)
- Navarro, L., De Garcia, A., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2012). Thermal loads inside buildings with phase change materials: Experimental results. *Energy Procedia*, 30(December), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.040>
- Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., & Simões da Silva, L. (2017). Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(February), 194–209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- Tecnofast. (2012). Oficinas quebrada blanca.
- Zúñiga, A. (2009). Consumo de Energía y Emisiones de gases Efecto Invernadero de la Minería del Cobre en Chile, 2011.