

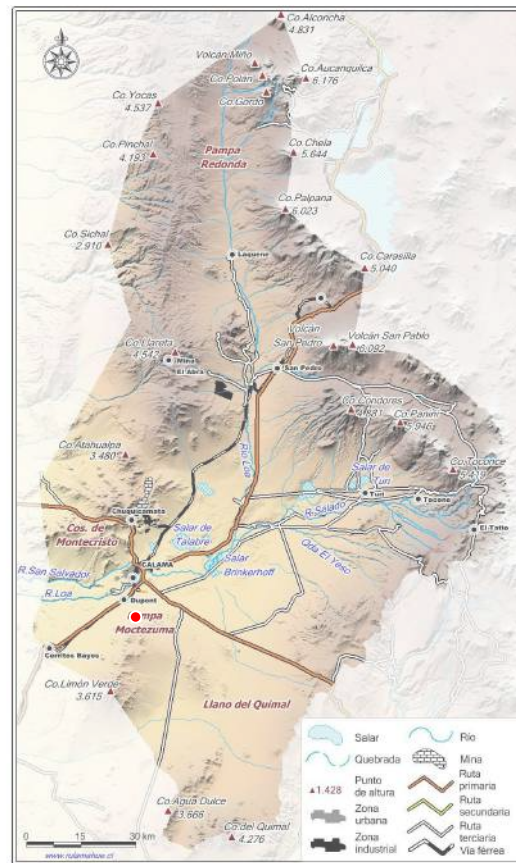


Escuela de Arquitectura
Diplomado en Arquitectura Sustentable
Agosto 2024

Casa Vodanovic
Calama

Grupo 5

Juan Pablo Meniconi Muñoz
Daniela Briceño Castillo
Víctor Cortés Montecinos
Rodrigo Pérez Kenchington



Localización y Clima

Caso de Estudio | Calama

Calama es una ciudad y comuna del norte grande de Chile, capital de la provincia de El Loa, región de Antofagasta. Se encuentra ubicada a 2260 msnm con un clima **desértico frío de altura** (Bwk). Los **veranos son largos, calurosos y áridos**; los **inviernos son cortos, fríos y secos** y está **mayormente despejado durante todo el año**.

El clima en Calama



Precipitaciones

Las **precipitaciones medias anuales es de 4,5 mm**. Sin embargo estas aumenta en la **temporada estival** llegan a un **promedio de 74 mm**. (invierno Atiplánico) durante el mes de febrero.

Promedio mensual de lluvia en Calama



Temperatura máxima y mínima promedio en Calama



Temperatura Promedio

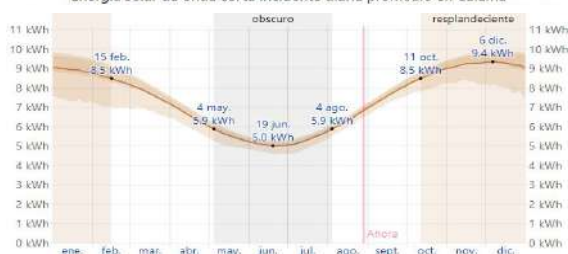
La **temporada templada dura 5,4 meses**, del 15 de octubre al 27 de marzo, y la temperatura **máxima promedio diaria** es más de **24 °C**. El **mes más cálido es enero**, con una temperatura **máxima promedio de 24 °C** y mínima de **8 °C**. Sin embargo, en noviembre de 2023, **se registraron 29.6°C**.

La **temporada fresca dura 2,1 meses**, del 1 de junio al 5 de agosto, y la **temperatura máxima promedio diaria es menos de 21 °C**. El **mes más frío del año es julio**, con una temperatura mínima promedio de **2 °C** y máxima de **20 °C**. Sin embargo **la temperatura más fría registrada** llegó a **-9,6°C**, en julio de 2009.

Sol

El **día más corto es el 20 de junio**, con **10 horas y 45 minutos** de luz natural; el **día más largo es el 21 de diciembre**, con **13 horas y 31 minutos** de luz natural.

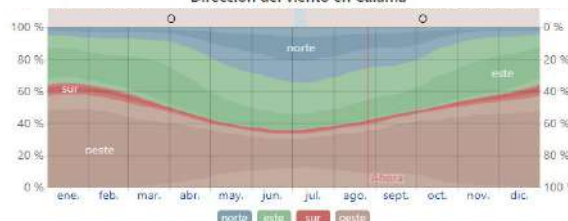
Energía solar de onda corta incidente diaria promedio en Calama



Viento

El **viento con más frecuencia** viene del **Oeste** durante 12 meses, del 11 de julio al 2 de julio, con un porcentaje máximo del 57 % en 1 de enero.

Dirección del viento en Calama



Humedad

El **nivel de humedad percibido**, medido por el porcentaje de tiempo en el cual el nivel de comodidad de humedad es **bochornoso, opresivo o insoportable**, no varía considerablemente durante el año, y **permanece prácticamente constante en 0 %**.

Niveles de comodidad de la humedad en Calama



Energía Solar

El periodo de **mayor energía** va del **11 de octubre al 15 de febrero**, con una energía de onda corta incidente diaria promedio superior a **8,5 kWh/m2**, siendo **diciembre** el más alto, con un promedio de **9,3 kWh/m2**.

El periodo de **menor energía**, del **4 de mayo al 4 de agosto**, con una energía de onda corta incidente diaria promedio de menos de **5,9 kWh/m2**, siendo **junio** el más bajo con un promedio de **5,1 kWh/m2**.

Carta Psicométrica

Caso de Estudio | Calama



Ventilación Natural

Aprovechamiento de la ventilación cruzada y enfriamiento por evaporación para refrescar el interior.



Protección Solar y Control de Ganancia Térmica

Uso de celosías, aleros y protecciones solares para regular la entrada de luz y reducir el sobrecalentamiento.



Uso de Masa Térmica y Ventilación Nocturna

Materiales con alta inercia térmica e higrotérmica que absorben calor y humedad durante el día y los liberan durante la noche, ayudando a mantener el equilibrio térmico y de humedad.



Minimización de Sistemas Activos

Diseño pasivo para reducir la dependencia de aire acondicionado y calefacción.

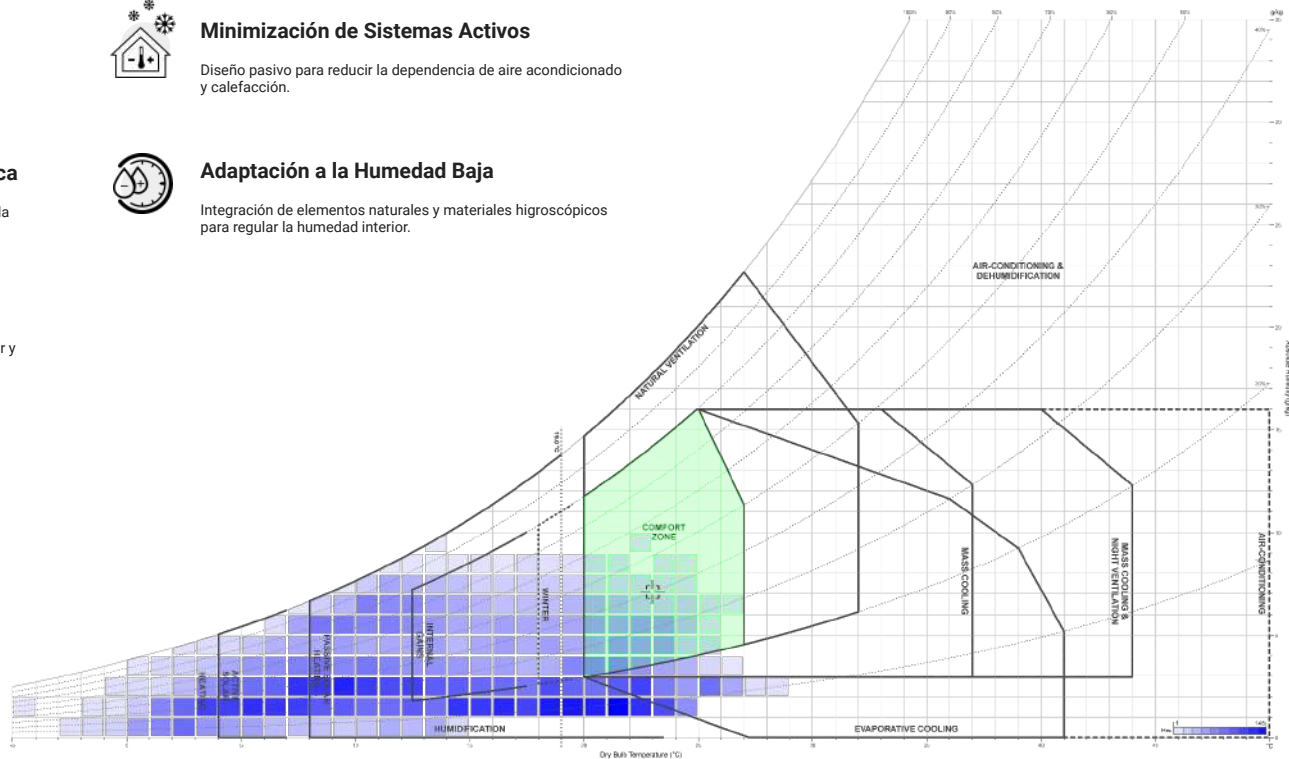


Adaptación a la Humedad Baja

Integración de elementos naturales y materiales higroscópicos para regular la humedad interior.

Hoja de Ruta

- 1 Contexto Geográfico y Clima
- 2 Emplazamiento y Distribución Programática
- 3 Paquetes Constructivos → Arquitectura Vernacular
- 4 Control Solar (Térmico e Iluminación)
- 5 Ventilación



Presentación Proyecto Original + Caso Base

Casa Vodanovic | Duarte Fournies Arquitectos



Puerto Varas, Chile

Valores de Transmitancia Térmica y Porcentajes de Vidriado Permitido, Zona B, Calama

ZONA TÉRMICA	COMPLEJO DE TECHUMBRE		COMPLEJO DE MUROS PERIMETRALES		COMPLEJO DE PISO VENTILADO		COMPLEJO DE PUERTAS OPACAS	
	U ⁽¹⁾	Rt ⁽¹⁾	U ⁽¹⁾	Rt ⁽¹⁾	U ⁽¹⁾	Rt ⁽¹⁾	U ⁽¹⁾	Rt ⁽¹⁾
	W/m²K	m²K/W	W/m²K	m²K/W	W/m²K	m²K/W	W/m²K	m²K/W
B	0,47	2,13	0,80	1,25	0,70	1,43	1,70	0,59

ZONA TÉRMICA	ORIENTACIÓN	% MÁXIMO V/S TRANSMITANCIA TÉRMICA "U" DE LA VENTANA											
		≤0,6	≤0,8	≤1,2	≤1,6	≤2,0	≤2,4	≤2,8	≤3,2	≤3,6	≤4,0	≤4,4	≤5,8
B	Norte	100%	99%	98%	97%	96%	94%	92%	90%	88%	85%	82%	30%
	O - P	92%	91%	89%	87%	84%	81%	78%	75%	71%	66%	60%	20%
	Sur	86%	84%	81%	78%	75%	71%	68%	64%	59%	54%	47%	10%
	OGT	52%	51%	49%	47%	46%	45%	43%	42%	40%	38%	35%	10%

Valores de Transmitancia Térmica y Porcentajes de Vidriado Caso Base



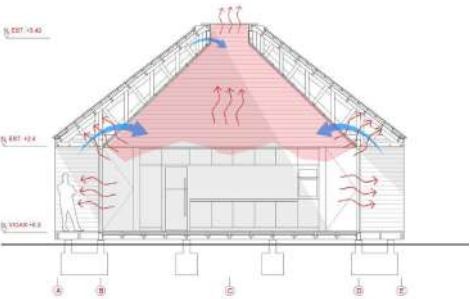
Termopanel
DVH
(3+6 mm)

Capas	Características
Cara Exterior	Vidrio Simple 3 mm
Tipo de Gas (Centro)	Aire 6 mm
Cara Interior	Vidrio Simple 3 mm

Parámetro	Valor	Detalle
Transmisión Solar Total (SHGC)	0.762	Fracción de la energía solar incidente transmitida al interior a través del vidrio
Transmisión Solar Directa	0.705	Fracción de la radiación solar directa que atraviesa el vidrio sin ser absorbida
Transmitancia Visible	0.812	Cantidad de luz visible que pasa a través del vidrio, influyendo en la iluminación natural
Valor U (W/m²·K)	3.159	Capacidad del vidrio para aislar térmicamente. Un valor más bajo indica mejor aislamiento

	Total	Norte (315 a 45 grados)	Oriente (45 a 135 grados)	Sur (135 a 225 grados)	Poniente (225 to 315 deg)
Área Total de Muros	118.26 m2	41.13 m2	17.85 m2	41.42 m2	17.85 m2
Área Muros sobre Nivel del Suelo	118.26 m2	41.13 m2	17.85 m2	41.42 m2	17.85 m2
Área de Apertura de Ventanas	42.13 m2	24.21 m2	—	17.92 m2	—
Relación Total Ventana-Muro	35.63 %	58.85 %	—	43.27 %	—
Relación Ventana-Muro sobre Nivel del Suelo	35.63 %	58.85 %	—	43.27 %	—

Envoltente Térmica (Proyecto Original)



Problemáticas Identificadas

Perdidas por puentes térmicos en aleros, cumbra sin aislación y cumbra con vidrio simple

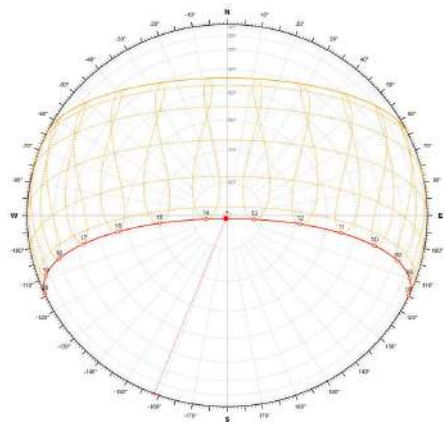
Altura de la casa supone una mayor demanda de calefacción. El techo ventilado está compuesto por grandes cerchas con importantes colchones de aire. Al estar la aislación por fuera de éste, existe una pérdida de calor hacia el entretecho y al exterior.

Diagrama Solar

Casa Vodanovic | Calama

Solsticio de Verano

21 de Diciembre



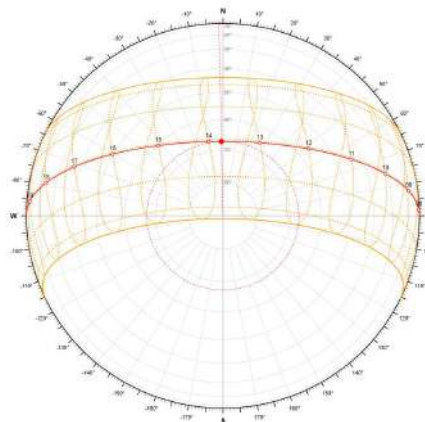
8:00 am
Azimut 109°
Altura 14°

13:35 pm
Azimut 160°
Altura 88°

17:00 pm
Azimut 101°
Altura 42°

Equinoccios

21 de Marzo / 21 de Septiembre



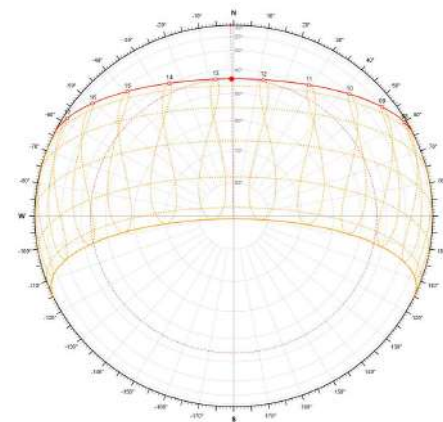
8:00 am
Azimut 86°
Altura 7°

13:35 pm
Azimut 1°
Altura 66°

17:00 pm
Azimut 73°
Altura 33°

Solsticio de Invierno

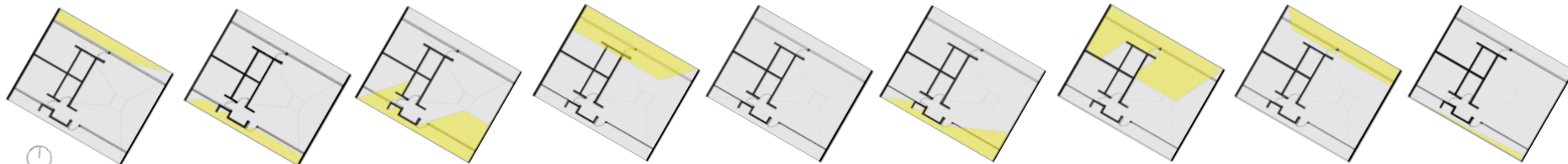
21 de Junio



8:00 am
Azimut 60°
Altura 8°

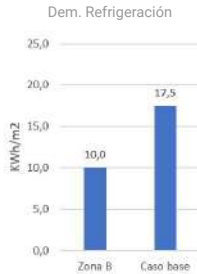
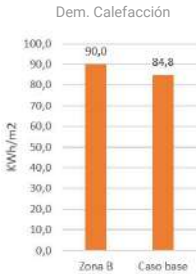
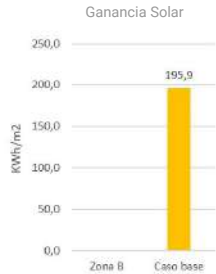
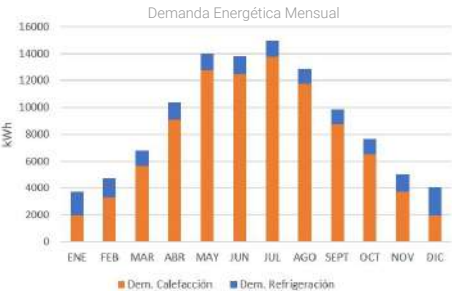
13:35 pm
Azimut 1°
Altura 44°

17:00 pm
Azimut 58°
Altura 11°



Resultados de la Simulación Energitermica del Caso Base

Casa Vodanovic | Calama



Passivhaus Estándar (referencia)

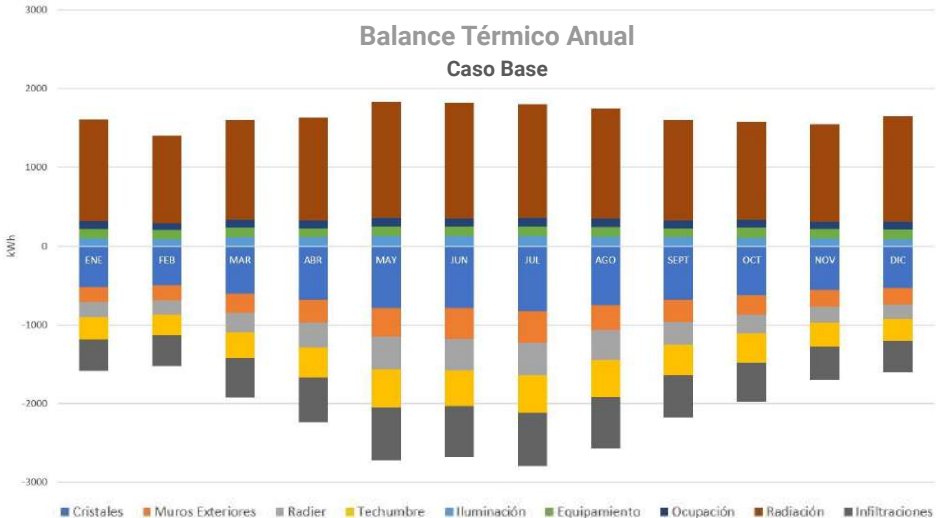
Calefacción <15 kWh/m²

Refrigeración <15 kWh/m²

El gráfico de balance térmico anual con datos de Design Builder nos muestra que las **infiltraciones**, la **techumbre** y el **piso ventilado** son las **principales fuentes de pérdida térmica**, especialmente en los **meses de invierno**, afectando negativamente la eficiencia energética de la vivienda.

Por otro lado, la **radiación solar** es la **mayor fuente de ganancia energética**, alcanzando su punto máximo en **verano**, lo que podría provocar el sobrecalentamiento sin protecciones adecuadas. Los **cristales** y **muros** también contribuyen a pérdidas notables, destacando la necesidad de mejorar la envolvente térmica.

Para optimizar el rendimiento del edificio, es fundamental mejorar el aislamiento del suelo, reducir las infiltraciones y gestionar las ganancias solares para equilibrar el confort térmico a lo largo del año.



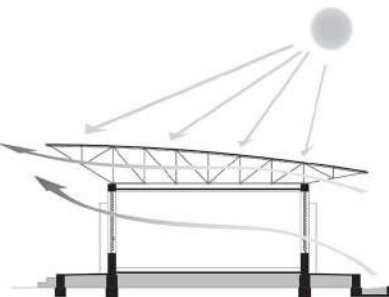
	Demanda calefacción KWh/m²	Demanda refrigeración KWh/m²
Zona B	90,0	10,0
Caso base	84,8	17,5

Según los resultados obtenidos del análisis energitermico para el total de la **Casa Vodanovic en Calama**, el desempeño en términos de calefacción y/o enfriamiento es considerablemente **alto y deficiente** si se compara con estándares Passivhaus, como también **valores estándar de construcción sustentable** en Chile de la Zona B (**90 kWh/m²** para demanda de calefacción y **10 kWh/m²** para refrigeración).



Estrategias

Caso Referencia | Burkina Faso



Escuela Primaria de Gando
Francis Kéré, Burkina Faso

Masa Térmica



Utilización de materiales con alta masa térmica **aislados por el exterior**. Uso del adobe como material vernacular, económico, pero por sobre todo con una alta capacidad de almacenaje de energía. Se buscan materiales de alta densidad, inercia térmica y calor específico.



Elementos de Control Solar

Proteger los elementos con elevada inercia térmica de la radiación solar directa mediante dispositivos de sombra.



Elementos como doble cubierta y aleros capaces de sombrear la casa.



Ventilación

La ventilación a través de elementos de diseño arquitectónico pasivos asegura la efectiva extracción de la energía térmica almacenada.



La ventilación nocturna es una estrategia clave para mantener un ambiente interior agradable y reducir la necesidad de sistemas mecánicos de enfriamiento. Doble cubierta para sombrear el techo y para lluvias de verano.

Resultados de Escenarios Propuestos

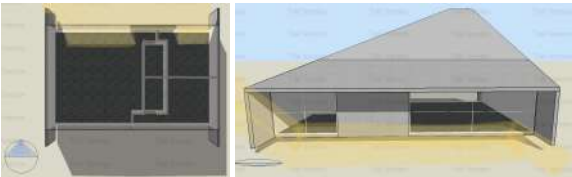
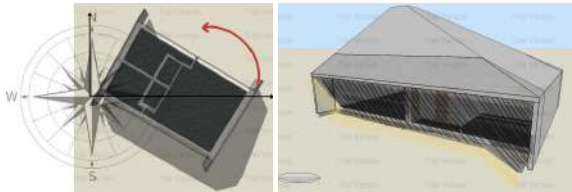
Iteración 1 | Orientación Solar

	Ganancia solar KWh/m2	Demanda calefacción KWh/m2	Demanda refrigeración KWh/m2
Caso base	195,9	84,8	17,5
Iteración 1	165,0 ▼	92,9 ▲	10,4 ▼

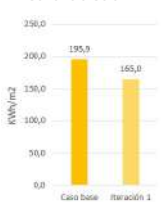
Analizando el comportamiento solar respecto a la orientación original y probando múltiples opciones para reorientar la vivienda, determinamos que la **orientación solar más favorable para la Casa Vodanovic es dirección Norte**. La simetría de la planta nos permite también orientar los dormitorios hacia el oriente.

En comparación con el caso base, logramos disminuir las ganancias solares y las demandas de refrigeración en un **15.77%** y **40.57%** respectivamente, comparado con la orientación inicial (**Norte girado en 30°**). Notamos que, aunque aumenta la demanda de calefacción en un **9.55%**, el impacto general es positivo debido a la reducción en las ganancias solares y la demanda de refrigeración.

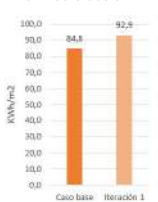
A partir de estos resultados, se plantea que las siguientes iteraciones se enfoquen en la mejora de los paquetes constructivos, buscando optimizar el aislamiento térmico y la eficiencia energética del proyecto para contrarrestar la mayor demanda de calefacción identificada.



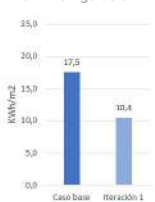
Ganancia Solar



Dem. Calefacción



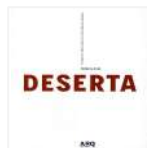
Dem. Refrigeración



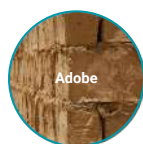
Resultados de Escenarios Propuestos

Iteración 2, 3, 4 y 5 | Piso, Muros y Techo – Paquetes Constructivos

	Ganancia solar KWh/m ²	Demanda calefacción KWh/m ²	Demanda refrigeración KWh/m ²
Iteración 1	165,0	92,9	10,4
Iteración 2	178,4 ▲	83,0 ▼	10,5 ▲
Iteración 3	192,0 ▲	73,9 ▼	7,5 ▼
Iteración 4	191,8 ▲	63,4 ▼	8,6 ▲
Iteración 5	114,2 ▼	39,0 ▼	8,2 ▲



Arquitectura Vernácula



Iteración 2: Tipología de Piso

Tipología de Piso y Paquete constructivo

Se reemplazó el piso ventilado por un radier de hormigón para **aumentar la masa térmica (0,45 W/m²K)**, logrando reducir la demanda de calefacción en un **10.66%**. Sin embargo, las ganancias solares aumentaron en un **8.12%** y la demanda de refrigeración en un **0.96%**, lo que indica la necesidad de ajustes adicionales en las siguientes iteraciones.

Iteración 3: Muros Perimetrales

Mejora del Paquete Constructivo

Se cambiaron los muros perimetrales a adobe (0,53 W/m²K), aumentando la **inercia térmica e higrotérmica** y utilizando **materiales tradicionales** de la zona. Esto resultó en una reducción adicional de la demanda de calefacción en un **10.96%** y de la demanda de refrigeración en un **28.57%**, aunque las ganancias solares continuaron incrementándose en un **7.62%**, motivando la necesidad de una cuarta iteración.

Iteración 4: Techo

Mejora del Paquete Constructivo

Se **mejoró el paquete constructivo del techo (0,36 W/m²K)**, lo que redujo las ganancias solares en un **2.08%**, la demanda de calefacción en un **4.60%** y la demanda de refrigeración en un **8.00%**, optimizando el rendimiento térmico.

Iteración 5: Mitigación de pérdidas de T°

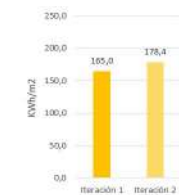
Reducción de Altura Máxima y porcentaje de vidrio como estrategia de reducción de pérdidas de temperatura

La **reducción de la altura original del techo (de 5.9 m a 2.6 m)** y la disminución del % de área vidriada, mejoró aún más la **eficiencia térmica**, reduciendo las ganancias solares en un **2.13%**, la demanda de calefacción en un **3.26%**, y la demanda de refrigeración en un **7.25%**, disminuyendo el volumen a acondicionar.

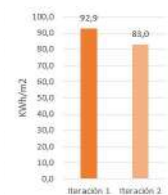


Iteración 2

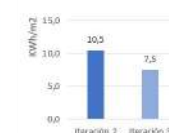
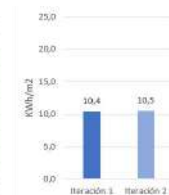
Ganancia Solar



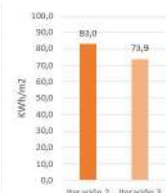
Dem. Calefacción



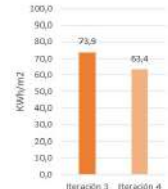
Dem. Refrigeración



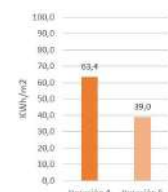
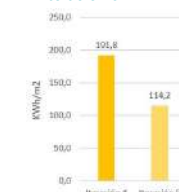
Iteración 3



Iteración 4



Iteración 5



Resultados de Escenarios Propuestos

Iteración 6 y 7 | Techo – Mejora de Envoltente Lucarnas y Ventanas – Control Solar

	Ganancia solar KWh/m2	Demanda calefacción KWh/m2	Demanda refrigeración KWh/m2
Iteración 5	114,2	39,0	8,2
Iteración 6	80,7	19,9	11,7
Iteración 7	54,9	24,0	6,4



Termopanel Low E
(e2=1)
(6+13 mm)

Capas	Características
Cara Exterior	Vidrio LowE 6 mm
Tipo de Gas (Centro)	Aire 13 mm
Cara Interior	Vidrio Simple 6 mm

Parámetro	Valor	Detalle
Transmisión Solar Total (SHGC)	0.568	Fracción de la energía solar incidente transmitida al interior a través del vidrio
Transmisión Solar Directa	0.474	Fracción de la radiación solar directa que atraviesa el vidrio sin ser absorbida
Transmitancia Visible	0.812	Cantidad de luz visible que pasa a través del vidrio, influyendo en la iluminación natural
Valor U (W/m²·K)	1.761	Capacidad del vidrio para aislar térmicamente. Un valor más bajo indica mejor aislamiento

Iteración 6: Mejora de Envoltente

Tipología de Techo
Mejora de Aislación en Muro Perimetral
Tipo de vidrioado

Analizando que la iteración de techo anterior (reducción de la altura) fue favorable, entendemos que tenemos muchas **pérdidas de calor a través de la envoltente**, por lo que en una 6ta iteración probamos con la **modificación de la geometría del techo** y al mismo tiempo **mejorar la aislación de techo (0,26 W/m2K)** y muro perimetral **(0,33 W/m2K)**. Se incluyó también en esta iteración el cambio del **tipo de vidrioado** optando por un **termopanel de baja emisividad con vidrios de 6mm y cámara de aire de 13mm (1,8 W/m2K)**

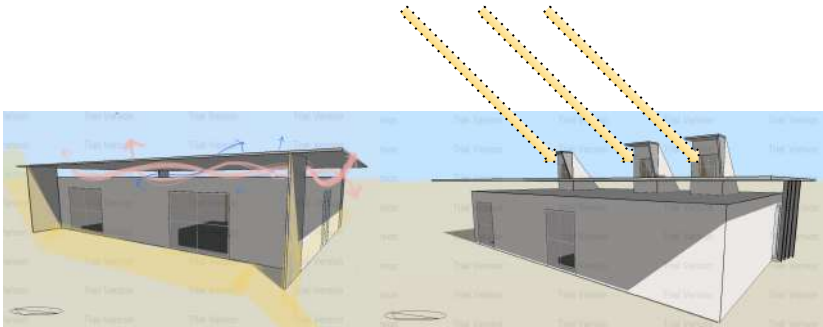
Como resultado, podemos ver que mejora en cuanto a ganancia solar, disminuyendo en un **29.33%**, y en demanda de calefacción, disminuyendo en un **48.97%**. Sin embargo, notamos que la demanda de refrigeración aumentó un **42.68%**. Consideramos que es importante **volver a valores por debajo de los 10 kWh/m2**, por lo que continuamos revisando los recintos más desfavorables de la vivienda.

Iteración 7: Control Solar

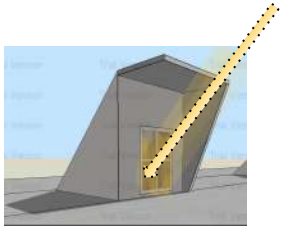
Dispositivos de Control Solar y su Relación con Elementos Colectores Interiores

En esta iteración incorporamos una estrategia solar que consistía en **lucarnas**, para ventilación y permitir la entrada de luz al interior y radiación solar en el muro sur de la zona de living y dormitorio. **Doble techo con aleros** para sombrear y mantener frío el paquete de techo del volumen interior y fachada norte. **Aleros de lucarnas y celosía** de ventana poniente. Se reducen las **dimensiones de los vanos de ventana** y estas se ubican con el propósito de **calentar muros interiores**. Estos muros, debido a la inercia térmica de su material, se plantean como elementos que potencian la recolección de energía solar.

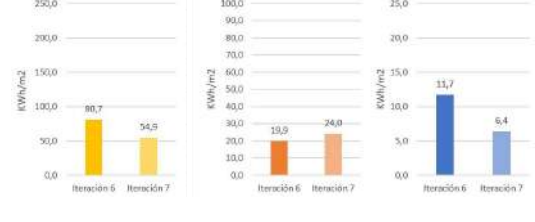
Podemos ver que disminuye la ganancia solar en un **31.97%**, disminuye la demanda de refrigeración en un **45.30%** y aumenta la demanda de calefacción en un **20.60%**. Esto nos lleva a una última iteración.



Iteración 6



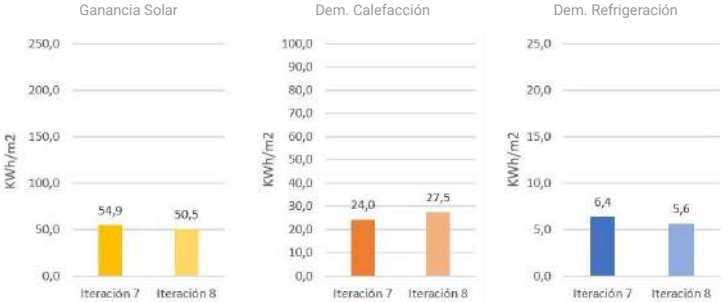
Iteración 7



Resultados de Escenarios Propuestos

Iteración 8 | Ventilación Nocturna

	Ganancia solar KWh/m2	Demanda calefacción KWh/m2	Demanda refrigeración KWh/m2
Iteración 7	54,9	24,0	6,4
Iteración 8	50,5 	27,5 	5,6 

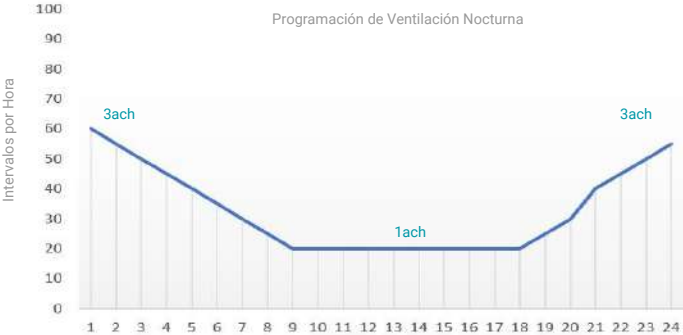
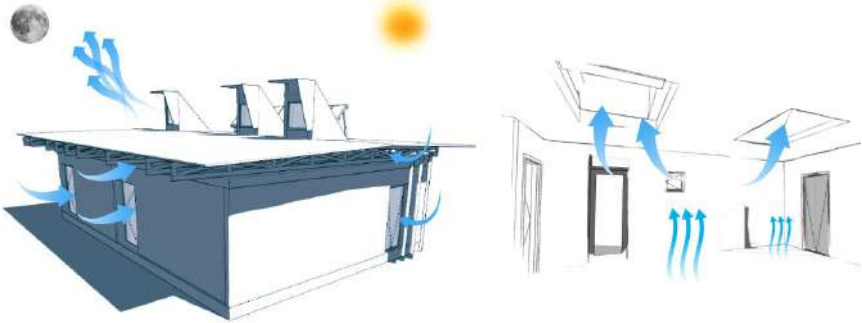


Según los valores referenciales de calefacción y refrigeración establecidos en los **estándares de construcción sustentable de viviendas en Chile** y las normativas **Passivhaus**, nuestro objetivo es reducir la demanda de calefacción y refrigeración a un **10-15%**. Para lograrlo, incorporamos una última iteración: la ventilación nocturna como **sistema de enfriamiento pasivo**.

Este sistema permite que **durante la noche el aire fresco ingrese al interior de la vivienda a través de la apertura de ventanas y lucarnas**, absorbiendo el calor almacenado en los muros de adobe, el piso y el techo, lo cual ayuda a **reducir las temperaturas interiores**. Al amanecer, cuando la temperatura exterior aumenta, las ventanas y lucarnas se cierran, manteniendo el aire fresco dentro de la vivienda a lo largo del día.

Logramos reducir en un **12.5%** las demandas de refrigeración y en un **8.03%** las ganancias solares, demostrando la efectividad de la **ventilación nocturna** como una estrategia pasiva fundamental para **mejorar el confort térmico en climas cálidos y secos**. Esta solución también contribuye al bienestar de los ocupantes, manteniendo un ambiente fresco y confortable durante el día sin la necesidad de depender exclusivamente de sistemas mecánicos de enfriamiento.

Se observó un aumento del **14.58%** en la demanda de calefacción. Este incremento sugiere que, aunque la ventilación nocturna es muy efectiva para reducir las t° en verano, debe ser **cuidadosamente gestionada y combinada con otras soluciones** térmicas y de aislamiento para maximizar su beneficio durante todo el año.

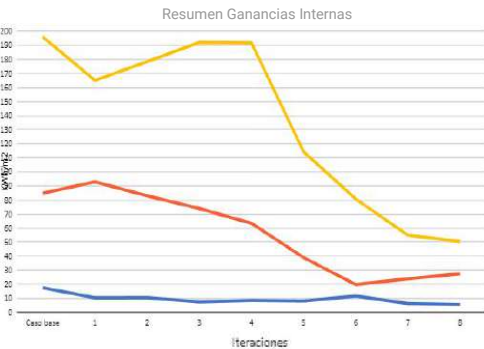
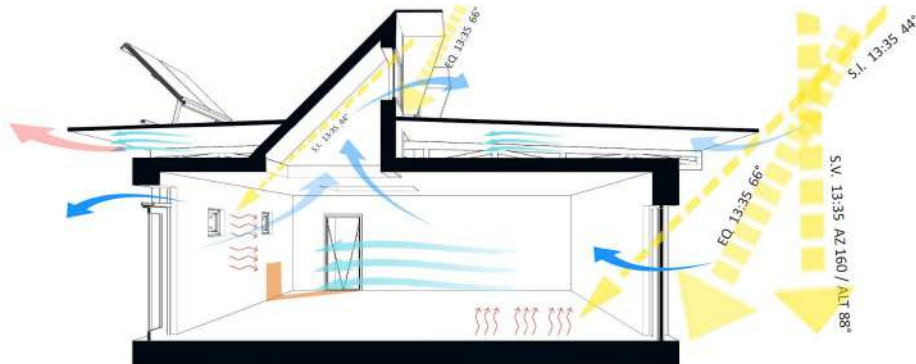


Resultados

Iteraciones Conjuntas

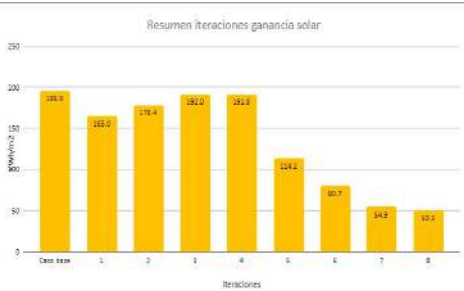
Los resultados obtenidos del estudio de la demanda de calefacción y enfriamiento en kWh/m2/año para el total de la vivienda son resultado de 8 iteraciones que propuestas por sí solas, fueron mejorando el desempeño de la vivienda. Las iteraciones resultantes fueron:

- 1 Orientación Solar
- 2 Tipología de Piso
- 3 Muros Perimetrales
- 4 Techo
- 5 Altura Techo y % de Vidrio
- 6 Mejora de Envolvente
- 7 Control Solar
- 8 Ventilación Nocturna



Iteración	Ganancia solar KWh/m2	Demanda calefacción KWh/m2	Demanda refrigeración KWh/m2
Caso base	195.9	84.8	17.5
1	165.0	92.9	10.4
2	178.4	83.0	10.5
3	192.0	73.9	7.5
4	191.8	63.4	8.6
5	114.2	39.0	8.2
6	80.7	19.9	11.7
7	54.9	24.0	6.4
8	50.5	27.5	5.6

Estas 8 iteraciones en conjunto lograron un resultado notable en la disminución de ganancias solares, pasando de 195,9 kWh/m2 a 50,5 kWh/m2, lo que se traduce en un 74,23% de disminución. En cuanto a las demandas de calefacción podemos ver que disminuye de 84,8 kWh/m2 a 27,5 kWh/m2, lo que se traduce en un 67,57% de disminución y en demandas de refrigeración disminuye de 17,5 kWh/m2 a 5,6 kWh/m2 lo que se traduce en un 68,0% de disminución. Estas mejoras reflejan un enfoque integral y efectivo en el diseño pasivo, logrando optimizar el confort interior y reducir significativamente la dependencia de sistemas mecánicos de climatización.



Conclusiones

1 Materialidad de la Envolvente

Las iteraciones **2, 3 y 4** generan **disminuciones importantes en las demandas de calefacción y refrigeración**. Esto se logró solamente cambiando el **paquete constructivo de la envolvente y la tipología de piso**. Esta sola operación, **desprovista de dispositivos solares y otras estrategias pasivas**, ya demuestran en parte la importancia de los **materiales de alta masa térmica en climas desérticos secos y de temperaturas abrasadoras**. Se constituye como una estrategia inicial de buen rendimiento para ser complementada por otras operaciones.

2 Dispositivos de Control Solar y Lucarnas

Resulta difícil pensar una estrategia de inercia térmica sin la utilización de estos elementos. Viendo los resultados de la iteración 7, podemos ver que **disminuye la ganancia solar en un 31,97%** disminuye la demanda de refrigeración en un **45.30%** y **aumenta la demanda de calefacción en un 20.60%** por lo que vamos a una última iteración.

Podemos argumentar también que en nuestro caso, los **elementos como celosías en ventanas poniente, no fueron tan útiles en nuestro caso**, sobre todo en las últimas iteraciones donde las **ganancias y demandas estaban equilibradas** y en ciertos casos **es más eficiente trabajar con aleros o controlar la radiación solar con vanos pequeños**.

3 Ventilación Nocturna

La estrategia de ventilación pasiva, como la ventilación nocturna, **reduce la necesidad de sistemas de enfriamiento mecánico y mejora el confort térmico**. Se hicieron pruebas utilizando un máximo de ventilación de 5 ACH y experimentado con los porcentajes, se llevó a la conclusión por medio del modelo, **que utilizando entre un 30% y un 40% de ese máximo, se cumple con el objetivo de enfriar el interior**. Al probar con el 100% de esos 5 ACH, hubo una tendencia de aumento de la calefacción.

4 Tipo Vidriado, Disminución % y Altura de la Envolvente

En el caso base, la relación total ventana-muro era del **35.63%**, con variaciones notables en las diferentes orientaciones (**58.85% al norte y 43.27% al sur**), lo que implicaba **altas pérdidas de calor y un bajo desempeño térmico**, aumentando la demanda de sistemas mecánicos para la climatización. La iteración final muestra una **reducción significativa en el Gross Window-Wall Ratio (GWR)**, ajustando el ratio total a un **10.17%**.

Las reducciones estratégicas en las distintas orientaciones (**19.82% al norte, 8.14% al sur, 1.56% al oeste y 8.17% al este**) reflejan un **enfoque más equilibrado para gestionar las ganancias y pérdidas de calor**. No solo mejora la **eficiencia energética de la vivienda**, sino que también **disminuye la necesidad de sistemas de climatización mecánica**, favoreciendo un diseño más sostenible.

Esta optimización contribuye a **reducir las pérdidas de calor, minimizar las fugas durante el invierno, controlar las ganancias solares y evitar el sobrecalentamiento en verano, optimizar la iluminación natural, y disminuir el consumo energético al reducir la dependencia de sistemas de calefacción y refrigeración**.

Se constata lo aprendido en el diplomado respecto de la **disminución del porcentaje de vidriado es una estrategia de mejoramiento básico de la eficiencia energotérmica de las construcciones**, pero sobre todo **cómo este factor incide en climas desérticos de alta radiación solar**.

También concluimos que, para nuestro caso, es **una buena idea bajar la altura interior de la envolvente** que, en climas de **altas oscilaciones térmicas como las de Calama, permite tener controlado el gasto por demanda de calefacción y refrigeración** favoreciendo no solo temas físico ambientales, sino también tópicos tan importantes como la pobreza energética.





Análisis y Proyecciones

Energía Solar + Ciclo de Vida + Huella de Carbono



Energía Solar Paneles Fotovoltaicos

Según los datos entregados por el **Ministerio de Energía de Chile**, se recomienda utilizar un **ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar donde se ubica el edificio**. En el caso de Calama, la latitud es de **22.5°**, por lo que los paneles solares deben instalarse con este ángulo para maximizar la captación de energía. Sin embargo, para efectos de este trabajo, se consideró el cálculo con una **inclinación de 0°**, es decir, un **techo plano**.

Considerando la superficie de la cubierta, restando las áreas ocupadas por las lucarnas, se calculó que el consumo total de energía de la vivienda es de **2.793 kWh** anuales. Para satisfacer estas necesidades energéticas, se requiere instalar un sistema fotovoltaico con una capacidad específica de paneles ajustados al espacio disponible.

En el caso de cubrir toda la techumbre de **147 m²** con una instalación de **4 kWp**, se estima un ahorro anual de **\$165.904** y se evitaría la emisión de 5 toneladas de CO₂ al año, según datos proporcionados por **ENEL**.



Ciclo de Vida Energía Incorporada + Energía Operativa

En este proyecto, no se alcanzó a realizar un cálculo detallado de la **energía incorporada de cada material**, pero inferimos que el impacto sería **relativamente bajo**, considerando que adoptamos referentes de arquitectura vernácula que han estudiado a fondo este tema.

La elección predominante de materiales como **adobe, lana mineral, mortero de cal**, entre otros, refuerzan esta premisa. El adobe es un **material natural que reduce significativamente el impacto ambiental asociado a la producción y transporte**, ya que vuelve a la tierra al final de su ciclo de vida.

La decisión de reemplazar la **masa térmica original por técnicas constructivas vernáculas**, no solo disminuye la energía incorporada al evitar materiales de alto impacto, sino que también mejora los requerimientos energéticos de la vivienda.

En cuanto a la **energía operativa**, la selección de estos materiales se complementa con estrategias de eficiencia energética que reducen las demandas de calefacción y refrigeración, optimizando el rendimiento del edificio y mejorando su comportamiento térmico durante toda su vida útil.



Huella de Carbono Emisiones de CO2

La sostenibilidad en la construcción y el uso eficiente de la energía al **utilizar materiales locales y adaptarse a las condiciones geográficas y climáticas específicas** puede reducir significativamente el consumo de energía fósil, lo que a su vez disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y material particulado. Además, la generación de electricidad mediante energía solar no solo ayuda a **reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables**, sino que también puede ofrecer beneficios económicos. **Al producir más energía de la que se consume**, es posible inyectar el excedente a la red eléctrica, lo que puede generar ingresos adicionales o compensar costos.

El uso de adobe para los muros exteriores e interiores del proyecto resultó en un carbono incorporado total de solo **23,241.18 kgCO₂e**. Comparativamente, si se hubiera utilizado hormigón (**229 kgCO₂e/m³**), el carbono incorporado superaría los **94,000 kgCO₂e**, más de cuatro veces el impacto actual. **Esta elección no solo reduce significativamente la huella de carbono, sino que también alinea el proyecto con principios de sostenibilidad y construcción responsable, aprovechando materiales locales y de bajo impacto ambiental.**

Ejemplificación Carbono Incorporado

Adobe	Volumen (m³)	Coefficiente (kgCO ₂ e/m³)	Carbono Incorporado (kgCO ₂ e)
Muros Exteriores	35.475	40	20.014
Muros Interiores	5.72	40	3.227
Total	41.195	-	23.241

Ejemplificación Carbono Operativo

Tipo de Combustible	Factor emisión (kgCO ₂ /kWh)	Consumo anual energía primaria (kWh/año)	Emisión anual CO ₂ por tipo de combustible (kgCO ₂ e)
Electricidad	0,307	2.793	857,45
CO ₂ operacional anual para el proyecto (kgCO ₂ e)			857,5
CO ₂ operacional anual para el proyecto (tCO ₂ e)			0,86