

MUES - MÁSTER UNIVERSITARIO EDIFICACIÓN SOSTENIBLE
TRABAJO FINAL DE MÁSTER

APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR PASSIVHAUS A DOS EDIFICACIONES EXISTENTES DISEÑADAS POR ALVAR AALTO:

-CASA DE VERANO EXPERIMENTAL
MUURATSALO, FINLANDIA.

-MAISON LOUIS CARRÉ
BAZOCHE SUR GUYONNE, FRANCIA.

Alumno: Ildefonso Nóvoa Olmedo.
Tutor: Ph.D. Víctor Manuel Hermo Sánchez.
Cotutor: M.Sc. Soraya López García.



Portada: Elaboración propia, Ilustración basada en modelos 3D de la Casa experimental en Muuratsalo y la Maison Louis Carré de Alvar Aalto. Fuentes de modelos 3D (ver Tabla 19).

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación no hubiese sido posible sin el constante apoyo del profesor Ph.D. Víctor Manuel Hermo Sánchez, tutor, y de M.Sc. Soraya López García, cotutora de este trabajo, quienes siempre estuvieron ahí ayudándome a resolver las dudas y compartiendo sus conocimientos. Muchas gracias a ambos.

También debo agradecer a la Xunta de Galicia por otorgarme la beca que me permitió realizar este máster en la UDC, sin ese apoyo económico, nada de esto hubiese sido posible.

Adicionalmente, quiero agradecer a mi familia, a mi madre Lourdes y a mis hermanas María Lourdes y Helena, que son un gran apoyo en mi vida; a mi padre Ildefonso, que ahora está con Dios, y que en vida hizo todo por nosotros, siempre creyó en mí, y estoy seguro de que desde el cielo está muy orgulloso de mi esfuerzo, eso me llena de satisfacción.

Quiero agradecer especialmente a mi esposa Laura, quien me ha apoyado desde el primer momento y ha sacrificado mucho para estar aquí a mi lado. Todo el esfuerzo de este último año no hubiese tenido sentido sin su compañía y su cariño.

Por último, agradezco a toda persona que dedique su tiempo a leer este trabajo de investigación, espero que la lectura les resulte amena, interesante y de utilidad.

*“Caminante, son tus huellas
el camino, y nada más;
caminante, no hay camino:
se hace camino al andar.
Al andar se hace camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante, no hay camino,
sino estelas en la mar.”*

Proverbios y cantares
de Antonio Machado

A todos los emigrantes,
que hacemos camino al andar.

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación explora la certificación Passivhaus desarrollada por el Passivhaus Institut, aplicando la herramienta PHPP 9 (Programa de Planificación Passivhaus), en dos edificaciones diseñadas por el arquitecto Alvar Aalto, con el fin de determinar si es posible certificar ambas viviendas y a la vez demostrar, de forma práctica, la validez del Estándar Passivhaus como método para reducir la demanda energética destinada a calefacción de viviendas rehabilitadas.

Para ello, primero se explora la obra del arquitecto Alvar Aalto, luego se definen las condiciones climáticas de cada emplazamiento, para después aplicar el Estándar Passivhaus a cada vivienda, obteniendo distintos resultados que luego son contrastados, y de los cuales se arrojan una serie de conclusiones.

También se valoran las dificultades que se presentaron en la implementación del Estándar Passivhaus en cada vivienda, con el fin de determinar si fueron originalmente diseñadas con criterios sostenibles.

PALABRAS CLAVE

Passivhaus, PHPP 9, Alvar Aalto, Sostenibilidad, Rehabilitación.

RESUMO

O seguinte traballo de investigación explora a certificación Passivhaus desenvolvida polo Passivhaus Institut, aplicando a ferramenta PHPP 9 (Passivhaus Planning Program), en dous edificios deseñados polo arquitecto Alvar Aalto, co fin de determinar se é posible certificar ambas as casas e ao mesmo tempo demostrar, dun xeito práctico, a validez da norma Passivhaus como método para reducir a demanda de enerxía de calefacción nas casas rehabilitadas.

Para iso, explórarse primeiro o traballo do arquitecto Alvar Aalto, logo defínense as condicións climáticas de cada lugar e logo aplícase o estándar Passivhaus a cada casa, obtendo diferentes resultados que logo se contrastan e dos cales extraense unha serie de conclusións.

Tamén se avalían as dificultades xurdidas na aplicación do estándar Passivhaus en cada fogar, para determinar se foron deseñadas orixinalmente con criterios sostibles.

PALABRAS CHAVE

Passivhaus, PHPP 9, Alvar Aalto, Sostibilidade, Rehabilitación.

ABSTRACT

The following research explores the Passivhaus certification developed by the Passivhaus Institut, applying the PHPP 9 tool (Passivhaus Planning Program), in two buildings designed by the architect Alvar Aalto, in order to determine if it is possible to certify both houses and, at the same time, demonstrate in a practical way, the validity of the Passivhaus Standard as a method to reduce the energy demand for heating in reconditioned houses.

To accomplish the objective, the work of the architect Alvar Aalto was explored first, then the climatic conditions of each location were defined, and then the Passivhaus Standard was applied to each home, obtaining different results that were then contrasted, and from which a series of conclusions were obtained.

The difficulties that arose in the implementation of the Passivhaus Standard in each house were also assessed in order to determine whether they were originally designed with sustainable criteria.

KEYWORDS

Passivhaus, PHPP 9, Alvar Aalto, Sustainability, Renovation.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GENERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. ALVAR AALTO Y SU OBRAS	5
3.1. CASA DE VERANO EXPERIMENTAL, EN MUURATSALO, FINLANDIA. (1952-1954).....	11
3.2. MAISON LOUIS CARRÉ, BAZOCHE SUR GUYONNE, FRANCIA (1956-1961)	17
4. CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS VIVIENDAS TOMADAS COMO CASO DE ESTUDIO.....	21
4.1. LOCALIZACIÓN.....	22
4.1.1 <i>Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia.</i>	22
4.1.2 <i>Maison Louis Carré, Bazoches Sur Guyonne, Francia.</i>	23
5. ANÁLISIS CLIMÁTICOS DE LOS DISTINTOS EMPLAZAMIENTOS.....	24
5.1. TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	25
5.1.1 <i>Temperatura y humedad en Jyväskylä, Finlandia. (Casa Experimental Muuratsalo)</i>	25
5.1.2 <i>Temperatura y humedad en París, Francia. (Maison Louis Carré)</i>	29
5.2. RADIACIÓN SOLAR	32
5.3. VIENTOS	35
5.3.1 <i>Vientos predominantes por estaciones</i>	37
6. APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR PASSIVHAUS.....	40
6.1. CASA DE VERANO EXPERIMENTAL, EN MUURATSALO, FINLANDIA.....	40
6.1.1 <i>Primera introducción de datos en PHPP</i>	43
6.1.2 <i>Resultado Inicial</i>	45
6.1.3 <i>Proceso de optimización energética</i>	46
6.1.4 <i>Sustitución de datos introducidos en ventanas y superficies</i>	48
6.1.5 <i>Añadiendo Energía Renovable</i>	51
6.1.6 <i>Comparando resultados</i>	55
6.1.7 <i>Resultado Final</i>	61
6.2. MAISON LOUIS CARRÉ, BAZOCHE SUR GUYONNE, FRANCIA.....	63
6.2.1 <i>Primera introducción de datos en PHPP</i>	66

6.2.2 <i>Resultado Inicial</i>	68
6.2.3 <i>Proceso de optimización energética</i>	69
6.2.4 <i>Sustitución de datos introducidos en ventanas y superficies</i>	71
6.2.5 <i>Añadiendo Energía Renovable</i>	74
6.2.6 <i>Comparando resultados</i>	77
6.2.7 <i>Resultado Final</i>	83
6.3. LA COMPACIDAD, UNA CARACTERÍSTICA DETERMINANTE.	85
6.4. LA OPCIÓN DE CERTIFICAR LAS EDIFICACIONES COMO ENERPHIT.....	87
6.4.1 <i>Certificando la Casa experimental en Muuratsalo bajo el estándar EnerPHit</i>	89
7. CONCLUSIONES.....	93
8. LIMITANTES	97
9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	98
10.BIBLIOGRAFÍA.....	99
11.ANEXOS.....	102

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la humanidad se encuentra en un momento crítico de su existencia como especie, si comparamos la forma como vivíamos no hace más de tres siglos, antes de la revolución industrial, nos daremos cuenta de un hecho innegable, que el ser humano ha aumentado su apetito por la energía casi de forma exponencial en los últimos años. En la actualidad, los países industrializados consumen la mitad de la energía del planeta, pero su población solo representa el 16% del total (Schuck 2007), y no parece que esta tendencia vaya a modificarse, al contrario, podría aumentar dadas las predicciones que se han hecho en relación con el aumento de la población mundial en los próximos años.

El gran problema es que esa energía no proviene de fuentes renovables, se calcula que el 80% de la demanda de energía mundial está cubierta por combustibles fósiles como el gas y el petróleo (Schuck 2007), esto se ha traducido en un gran aumento en las emisiones de CO₂ en las últimas décadas, que según los científicos traerá como consecuencia un cambio climático irreversible, además de la destrucción de la capa de ozono, la expansión de las zonas desérticas, el aumento del nivel del mar, inundaciones y el desplazamiento de las zonas climáticas (Schuck 2007), esto podría traer como consecuencia otros problemas asociados como hambrunas, guerras y el surgimiento de nuevas enfermedades tropicales más al norte del planeta donde anteriormente no se producían.

Debido a esto, se ha vuelto una prioridad reducir el consumo energético en todos los ámbitos de la vida humana y uno de los que más energía consume es el destinado a la calefacción de las viviendas. En Alemania, por ejemplo, su parque inmobiliario consume el 30% de toda la energía consumida en el país (Schuck 2007), y no es de extrañar ya que es un problema generalizado en la mayor parte del territorio europeo dada la inclemencia del invierno en este continente.

Ante esta situación en Alemania surgió un grupo de científicos, arquitectos e ingenieros que, aunando esfuerzos, han logrado desarrollar una metodología que permite certificar de forma precisa el consumo de una vivienda antes de ser construida y reducir drásticamente la demanda energética asociada a la calefacción. Se trata del Estándar Passivhaus, desarrollado por el Dr. Wolfgang Feist y sus colaboradores en el Passivhaus Institut (Feist 2015).

Su planteamiento se podría resumir en: reducir el consumo energético sin comprometer el confort térmico de la vivienda. Esto lo logran aplicando a grandes rasgos estos cuatro principios:

1. Eliminando cualquier puente térmico y aislando muy bien la envolvente de la vivienda.
2. Haciendo que la envolvente de la vivienda sea totalmente hermética, reduciendo al máximo la pérdida de calor por ventilación, añadiendo un recuperador de calor que evite la pérdida de energía y a la vez garantice la salubridad del aire interior.
3. Instalando ventanas con acristalamiento triple y puertas de alto rendimiento que impidan la pérdida de calor.
4. Gestionando las ganancias de calor provenientes de la radiación solar, aprovechándolas en invierno y minimizándolas en verano.

Este planteamiento, está revolucionando el sector inmobiliario en Europa, ya que ahora no solo se tiene en cuenta la ubicación de un inmueble para determinar su valor, o los metros cuadrados de superficie construida, o la belleza de su arquitectura. Ahora, la baja demanda energética es el punto determinante en el cual inversores y posibles compradores se fijan a la hora de invertir su dinero o adquirir una vivienda (Zelger, Figl y Scharnhorst 2016). Y es en ese punto donde la certificación Passivhaus es fundamental porque permite determinar con seguridad la demanda energética de cualquier

inmueble, cosa que en la actualidad, pocas instituciones logran hacer, ya que no tienen ni la metodología ni la tecnología necesaria para certificarlo de forma tan precisa, por lo cual en los últimos años el Passivhaus Institut ha crecido en prestigio y ha expandido su certificación por toda Europa, además de a otros países como Canadá, Estados Unidos y China.

Actualmente Europa posee un parque inmobiliario enorme y de gran valor, pero muy antiguo. Por lo cual no solo tenemos que centrarnos en las viviendas nuevas que se van a construir en los próximos años, sino también implementar estas nuevas mejoras en las edificaciones existentes, porque esa será la única forma en la que podremos atajar el problema de alto consumo energético de forma rápida y efectiva.

Pero para cumplir con el Estándar Passivhaus, hay que lograr que la demanda anual de energía destinada a la calefacción de la vivienda no supere los 15 kWh/m²a (kilovatios hora por metro cuadrado al año) (Feist 2015), esto en viviendas construidas de cero es mucho más fácil de lograr que en edificaciones existentes. Sin embargo, algunos especialistas afirman que existe un gran margen que puede ser optimizado en las edificaciones existentes si se aplica el Estándar Passivhaus correctamente (Corner, Fillinger y Kwok 2017).

Por lo cual, en este trabajo de investigación pondremos a prueba el Estándar Passivhaus al implementarlo en dos edificaciones del siglo pasado, en específico construidas entre los años 50 y 60, diseñadas por el renombrado arquitecto Alvar Aalto y ubicadas en dos zonas climáticas muy distintas, con el fin de determinar si, en efecto, el Estándar Passivhaus es capaz de reducir la demanda de calefacción en edificaciones antiguas en un 90% como afirman algunos autores (Schuck 2007).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Demostrar la aplicabilidad del estándar Passivhaus a edificaciones existentes construidas entre los años 50 y 60.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la demanda de calefacción anual actual de las dos ediciones, la Casa Experimental de Muuratsalo y la Maison Louis Carré.
- Determinar en cada caso cuales son las adecuaciones requeridas en cada edificación para conseguir que cumplan con los límites de consumo anual establecidos en el Estándar Passivhaus destinados a calefacción.
- Determinar la demanda de calefacción anual de ambas ediciones después de implementar el estándar Passivhaus.
- Determinar en ambas viviendas que soluciones fueron aplicadas de forma similar para identificar posibles patrones que puedan convertirse en recomendaciones a la hora de aplicar el estándar Passivhaus a viviendas construidas entre los años 50 y 60.

3. ALVAR AALTO Y SU OBRAS

“La Arquitectura moderna no es utilizar materiales nuevos e inmaduros sino principalmente perfeccionar los materiales dándoles un sentido humano”
Alvar Aalto (Lahti 2009)

Alvar Aalto nació en el 3 de febrero de 1898 en Kuortane, Ostrobotnia meridional, Finlandia. Su padre era ingeniero agrimensor, y desde muy pequeño empezó a interesarse por el dibujo técnico. Su abuelo era agente forestal y del aprendió que “El bosque puede prescindir del hombre, pero el hombre del bosque no”. A los 8 años de edad sufrió la pérdida de su madre que fallece de forma inesperada. La hermana de su madre, Flora, desde ese momento se hará cargo de él. (Lahti 2009).

Estudió Arquitectura en la escuela Politécnica de Helsinki, donde se familiarizó con la arquitectura antigua, de la edad media, y de la edad moderna. Su carrera se vio interrumpida por la guerra civil de 1918. Durante sus estudios su padre compró una casa en Alajärvi, la cual fue reformada por completo por Alvar Aalto, este se convirtió en su primer proyecto. En 1921 finalizó sus estudios de arquitectura.
(Lahti 2009)

En 1923 Aalto abre su estudio de arquitectura en la ciudad de Jyväskylä, ahí contrató a la arquitecta Aino Marsio, quien en 1924 se convertiría en su primera esposa. Trabajaron en dicho estudio hasta 1927.

Aunque en sus inicios, Aalto realizó obras con un marcado carácter clásico, como la Iglesia de Muurame (1926-1929) (Figura 1), pronto se destacó como arquitecto del movimiento moderno, con la sede del periódico Turun Sanomat (1927-1929) (Figura 2). Esto hizo que

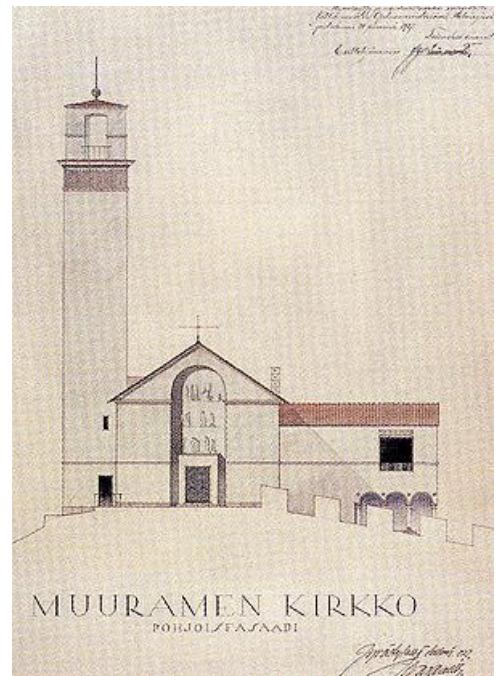


Figura 1: Iglesia de Muurame (1926-1929).
(Fuente: ver Tabla 18)



Figura 2: Turun Sanomat (1927-1929). Fuente: ver Tabla 18.

Aalto pronto se codeara con arquitectos de renombre como: Le Corbusier, Johannes Duiker, Sirfried Giedion y Fernand Leger. De la Bauhaus a László Moholy-Nagy y en el congreso Internacional de arquitectura moderna estableció contacto con Walter Gropius y Karl Moser (Lahti 2009). Ese nuevo estilo internacional sería una influencia en la obra de Aalto, pero con una interpretación más humanista y cercana a la naturaleza.

Y esta filosofía él la expone en 1938, en una conferencia realizada en el congreso nórdico de Arquitectura, celebrado en Oslo donde manifestó:

“Ya he dicho con anterioridad que el mejor comité de estandarización es la misma naturaleza, que la estandarización se da en la naturaleza en primer lugar casi exclusivamente en las unidades más pequeñas posibles, las células. El resultado con millones de combinaciones flexibles que no se encuentran en el formalismo; otro de los resultados es la abundancia sin fin y una variabilidad ilimitada de formas orgánicas que crecen. Este es el camino que la estandarización de la arquitectura debe seguir.” (Lahti 2009)

Y es que Aalto ese mismo año estaba realizando un encargo muy especial, la Villa Mairea (1938-1939) (Figura 3), una lujosa residencia en Noormarkku, al oeste de Finlandia, situada en lo alto de una colina rodeada de un denso bosque, en la que Aalto libera todo su potencial creativo y transmite su esencia a una obra que destaca por su relación con la naturaleza, la utilización de la madera como protagonista y el ladrillo desnudo.



Figura 3: Villa Mairea (1938-1939). Fuente: ver Tabla 18.

Con esta obra, Aalto se desliga por completo del funcionalismo formal de la época, fue quien se atrevió a sustituir el acero por la madera, quien rescató el ladrillo rústico y lo validó en la arquitectura moderna de la época. Su obra destacó por su exquisita elegancia, amor por los detalles y un marcado diseño biofílico, cuando en la época ni siquiera se pensaba en dicho concepto.

Ya para este momento Aalto había realizado muchas obras, de las cuales es importante destacar:

- La Biblioteca municipal de Viipuri, Rusia (1924-1935).
- El Sanitorio Antituberculoso de Paimio, Finlandia (1928-1933).
- La Casa estudio de Alvar Aalto, Riihitie, Helsinki, Finlandia (1935-1936).
- Pabellón de Finlandia, Nueva York, EEUU. (1938-1939).

Pero en 1939 se desata la Segunda Guerra Mundial. Aalto que ya es una figura pública en Finlandia, con amigos influyentes en el extranjero, por lo que se dedicó a dar discursos sobre la contienda, con el propósito de conseguir ayuda para Finlandia. Al

volver a su país, envuelto en el caos de la guerra, fue elegido presidente de la Federación de Arquitectos de Finlandia (SAFA) en 1943, cargo que ocupó hasta 1958. (Lahti 2009).

Al concluir la guerra, Aalto fue nombrado profesor del MIT (Massachusetts Institute of Technology) en los Estados Unidos y recibió el encargo de proyectar su residencia de estudiantes, la Baker House (1947-



Figura 4: Baker House (1947-1949). Fuente: ver Tabla 18.

1949). Construida en su totalidad con ladrillos defectuosos provenientes de una fábrica de ladrillos que había sido cerrada, es un gran ejemplo de arquitectura sostenible, ya que su construcción se hizo con materiales locales, que eran considerados desechos. La utilización de estos ladrillos le dio a la fachada del edificio una textura rústica y natural, que, aunado a su forma sinuosa, dota a la edificación de un carácter moderno, pero a la vez orgánico. Aalto, mientras diseñaba esta residencia estudiantil, escribió:

“El objeto ideal de la arquitectura se puede formular de la siguiente manera: la función de un edificio es la de ser un instrumento que reúna todos los efectos positivos de la naturaleza, para las personas que viven en ellos, por otra parte, tiene el cometido de proteger a sus habitantes de todos los elementos desfavorables, que pueda haber en la naturaleza o en el entorno determinado del edificio”. Alvar Aalto (Lahti 2009)

A su regreso de EEUU, en 1949, fallece su esposa Aino, a causa de una grave enfermedad, lo que supuso un duro golpe para Aalto. Se refugió en su trabajo en un intento de superar la depresión que este evento le acarreó. Ese mismo año había ganado el concurso para el diseño del Ayuntamiento de la Ciudad de Säynätsalo, en Jyväskylä, Finlandia (1949-1952). Durante el desarrollo de dicho proyecto, una joven arquitecta, comienza a trabajar en su despacho, Elissa Mäkiniemi, la relación laboral en poco tiempo se convirtió en sentimental y se casaron. Aalto comienza así a rehacer su vida. (*Lahti 2009*).



Figura 5: Ayuntamiento de Säynätsalo, Jyväskylä, Finlandia (1949-1952). Fuente: ver Tabla 18.

Ayuntamiento de Säynätsalo se compone un conjunto de edificios cuya superficie útil ronda los 1.800 m², Aalto lo describió de la siguiente forma:

"El edificio, que se levanta en una cuesta relativamente empinada, está construido en torno a un recinto central, el patio, tanto en sus partes de una planta, como en las de dos. El patio interior forma una superficie en altura levantada con la tierra que quedó de las excavaciones para los cimientos. En la planta baja del edificio estaban previstos locales comerciales. Éstos están construidos en dos niveles, el de la calle y el del patio. Así, el verdadero

edificio administrativo, cuyas salas se agrupan en torno al patio, se libera del efecto vulgarizador de las tiendas". Alvar Aalto (Lahti 2009)

Todos los edificios fueron construidos de ladrillo rojo deslucidos, de forma similar a su



Figura 6: Techo Ayuntamiento de Säynätsalo
Fuente: ver Tabla 18.

obra previa, la residencia estudiantil del MIT. El ladrillo también está presente en el interior de los espacios, dando un aspecto rústico a todo el conjunto. Les acompañan unos hermosos techos de madera que, en el edificio principal, se encargan de cubrir de forma elegante la doble altura del interior de la torre que remata la edificación. Sobre esto, Aalto expone:

"Una de las funciones principales de la arquitectura es encontrar la proporción. El Ayuntamiento de Säynätsalo, con su pequeña plaza central y su ubicación en un punto clave de la céntrica plaza mayor en forma de cuña, es un intento en este sentido. Cada una de las diferentes partes del edificio se adecuan a su propia proporción; la torre ya



Figura 7: Ayuntamiento de Säynätsalo, Jyväskylä, Finlandia (1949-1952). Fuente: ver Tabla 18.

no es una torre sino una masa unificada bajo la que se encuentra soterrada la sala del consejo, es decir el principal símbolo de la administración." Alvar Aalto (Lahti 2009)

3.1. CASA DE VERANO EXPERIMENTAL, EN MUURATSALO, FINLANDIA. (1952-1954)

Al finalizar el Ayuntamiento de Säynätsalo, Aalto emprende a pocos kilómetros al sur de Säynätsalo una de sus obras más importantes, la Casa de Verano Experimental, en Muuratsalo, Finlandia. En sus escritos la describió de la siguiente forma:

“En la elevada isla de Muuratsalo, en medio del lago Päijänne, se encuentra una casa experimental aún sin nombre, que fue construida para dar al arquitecto la oportunidad de diseñar por puro placer. Pero también se ha hecho con fines experimentales serios, esencialmente para tratar problemas que el arquitecto no puede resolver en proyectos de construcción ordinarios. Por supuesto, uno debe siempre experimentar, incluso con los edificios de sus clientes, si no, no habría ningún progreso ni en la arquitectura ni en la



Figura 8: Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: ver Tabla 18.

tecnología de la construcción. Sin embargo, a los experimentos sólo se les puede dar una estrecha libertad dado los requisitos prácticos que limitan a un proyecto de construcción real. En nuestra casa de verano (de Aalto y su esposa, Elissa) queríamos experimentar incluso con cosas cuyo contenido práctico nadie ha medido todavía.” Alvar Aalto (Holma, Lukkarinen y Aalto 2009).

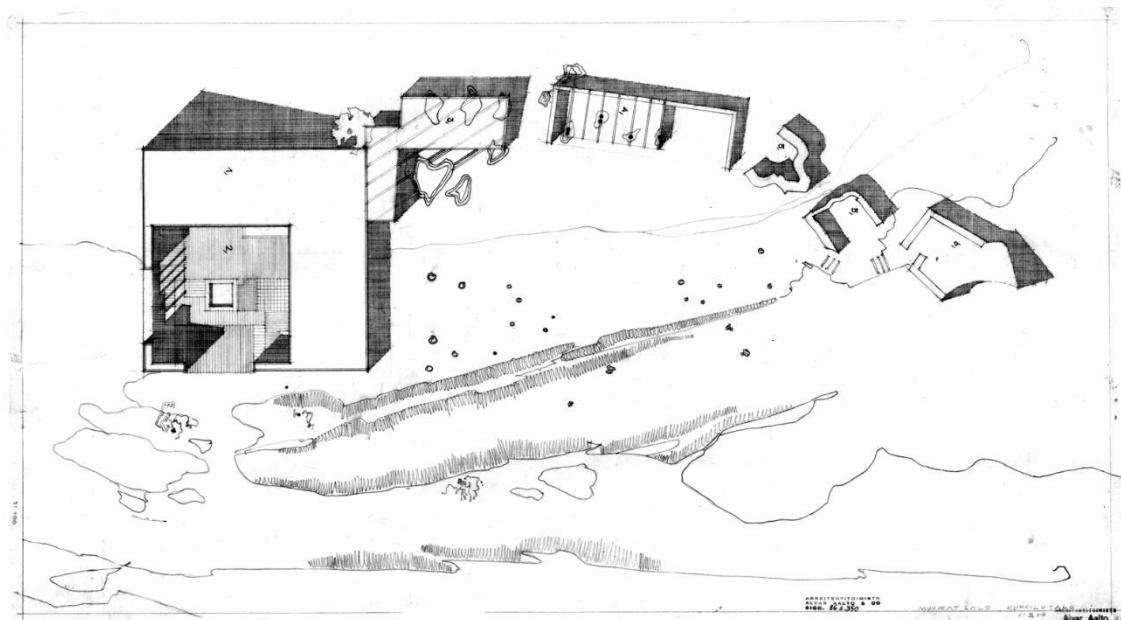


Figura 9: Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia, Vista Cenital. Fuente: ver Tabla 18.

“El complejo de edificios en Muuratsalo está destinado a convertirse en una especie de síntesis entre un estudio de arquitectura protegido y un centro experimental donde uno puede esperar probar ideas que no están listas para ser probados en otro lugar, y donde la proximidad a la naturaleza puede dar una nueva inspiración tanto en términos de forma como de construcción. Tal vez sea posible encontrar allí el carácter específico de los detalles arquitectónicos que nuestro clima del norte requiere.” Alvar Aalto (Holma, Lukkarinen y Aalto 2009).

Los cimientos de la vivienda reposan directamente sobre las rocas que conforman el terreno. Al ser un terreno elevado, este emplazamiento le otorga a la casa un carácter

casi épico, que, junto con su patio central, trasmite ciertas reminiscencias de los templos griegos y no es de extrañar, ya que Aalto siempre se declaró un amante de la arquitectura clásica. Los muros exteriores de la vivienda que rodean el patio central son de ladrillo rojo, su cara exterior fue pintada de blanco, definiendo un contraste hermoso entre el exterior frío de la vivienda y su interior cálido, en cuyo punto central se ubica un fogón al aire libre, que fortalece este concepto. Aalto lo describe de la siguiente forma:

“el conjunto de edificios está dominado por el fuego que arde en el centro del patio y que, desde el punto de vista de la practicidad y la comodidad, sirve para el mismo propósito que la hoguera de un campamento de invierno, donde el brillo del fuego y sus reflejos de los bancos de nieve circundantes crean una agradable sensación de calor, casi mística.” Alvar Aalto (Holma, Lukkarinen y Aalto 2009).

También se pintaron de blanco las paredes de madera del ala traseras, donde se encuentra el área de invitados. Esa ala se construyó un año después y resalta justamente por ser su estructura completamente de madera, a diferencia del resto de la vivienda, construida en ladrillos. (Lahti 2009).



Figura 10: Cimientos Casa Experimental. Fuente: ver Tabla 18.

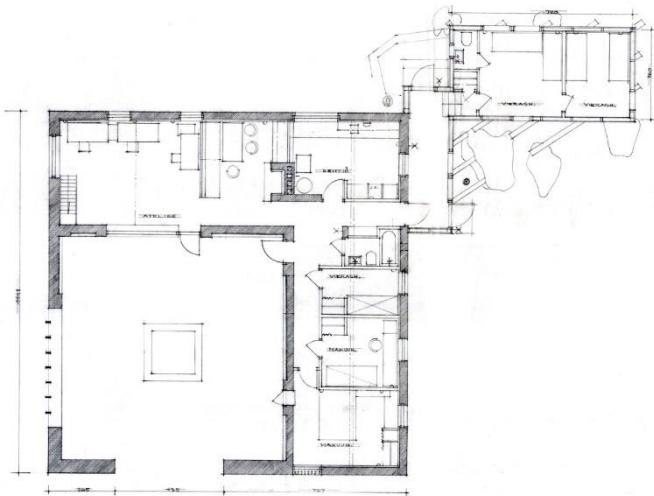


Figura 11: Planta Arquitectónica Casa Experimental Muuratsalo.
Fuente: ver Tabla 18.

patio central, se tiene del lago que aparece franqueado por los muros exteriores de la vivienda que parecen enmarcar el paisaje como si de una obra de arte pictórico se tratase. Lanti, en su libro titulado Alvar Aalto los describe de una forma excelente:



Figura 12: Vista patio interno. Casa Experimental Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.

Alrededor del patio central, se agrupan el salón y el taller de pintura en el ala norte, en la este las habitaciones principales, conectadas por un pasillo, en la parte posterior, se encuentran las habitaciones de invitados y los sanitarios, y articulando estos espacios se encuentra, como zona intermedia, la cocina.

La elegancia con la que Aalto funde el espacio interior con el exterior es realmente notable, y tiene su mayor expresión en la visual que desde el interior de la vivienda, a través del

“Los muros, que se levantan solitarios y las aperturas venas tiene algo de pasado y de perdido. En ellas reside la nostalgia de las ruinas. La relación del edificio con la naturaleza nos da una impresión casi mística” (Lahti 2009)

Artísticos sin duda que también lo son los muros internos de la vivienda, que Aalto, en su afán experimental, convirtió quizás sin esa intención, en un Mondrian de ladrillos

trabajados de distintas formas, cada una más hermosa que la anterior, obteniendo una

fachada vibrante, moderna, pero a la vez rústica, que se integra de forma armónica con el entorno natural. Sobre esto Aalto, escribió:

“El edificio ha sido diseñado, con su objetivo experimental en mente, de manera que difiere de lo normal; no se han utilizado las mismas formas en todas partes, ni la misma escala, ni la misma construcción. Así, todos los muros, alrededor del patio cerrado están divididos en aproximadamente cincuenta paneles en los que se ha probado el efecto de los materiales cerámicos, el ladrillo, las juntas, los diferentes formatos de ladrillo

y los tratamientos de superficie”. Alvar Aalto

(Holma, Lukkarinen y Aalto 2009)

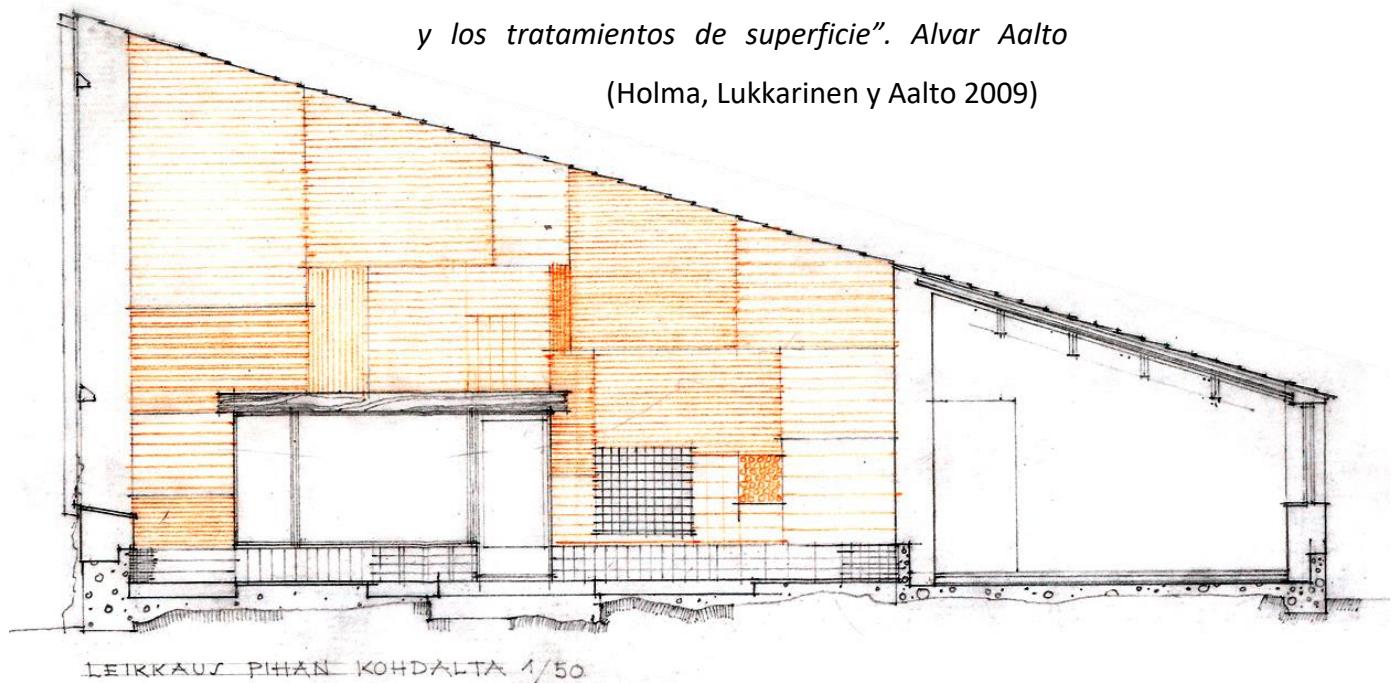


Figura 13: Alzado Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: ver Tabla 18.

“Estos experimentos con la forma también incluyen pruebas de durabilidad que son diariamente objeto de observación por parte del arquitecto. Experimentos similares tienen lugar en el patio central, donde de un año a otro hemos probado diferentes técnicas para revestir diferentes áreas, desde el punto de vista del efecto estético.” Alvar Aalto (Holma, Lukkarinen y Aalto 2009)

“Hemos probado de todo, desde superficies de ladrillo y piedra hasta plantas y musgos decorativos. La construcción de las paredes del edificio varía, y con fines experimentales se han intentado diferentes construcciones de techo.”

Alvar Aalto (Holma, Lukkarinen y Aalto 2009)

En sus escritos, Aalto explica su intención de construir otros edificios aledaños para continuar con su proceso de experimentación, entre ellos enumera:

1. *EXPERIMENTOS CON UN EDIFICIO SIN FUNDACIONES, en este caso, un sistema diagonal de vigas colocadas sobre las rocas incrustadas en la cresta morrena, de manera que el edificio de madera se ha estabilizado a pesar de la ubicación indeterminada de los soportes estructurales.*
2. *EXPERIMENTOS DE UNA COLUMNA IRREGULAR (COLUMNA NO LINEAL) en la que las columnas que sostienen el edificio se han colocado en los puntos más ventajosos del terreno.*
3. *CONSTRUCCIONES DE LADRILLO DE FORMA LIBRE. Un intento de desarrollar un tipo de ladrillo estándar para que sea posible hacer paredes de forma curva caprichosa sin tener que cambiar las piezas estándar, en otras palabras, una especie de desarrollo posterior a los ladrillos de formas ya prácticamente olvidados, pero adaptados para otros fines más actuales.*
4. *Un estudio que no está conectado al sistema de calefacción de los otros edificios, corona el grupo de edificios. Este pabellón separado implica un EXPERIMENTO CON CALEFACCIÓN SOLAR tal que las superficies de las paredes y los techos, que acumulan el calor, son independientes de las otras partes del edificio. Esto contrasta con lo que se ha practicado en los experimentos puramente técnicos hasta la fecha.” Alvar Aalto (Holma, Lukkarinen y Aalto 2009).*

3.2. MAISON LOUIS CARRÉ, BAZOCHE SUR GUYONNE, FRANCIA (1956-1961)

Esta obra fue construida por encargo del galerista de arte francés Louis Carré (1897-1977) quien conoció a Aalto en uno de sus viajes a Venecia en el año 1956. Tenía muchas amistades en común, entre ella a Fernand Léger y Alexander Calder. (Lahti 2009)

Un año antes, Louis Carré había adquirido un terreno en Bazoches-sur-Guyonne, entre Chartres y Versalles, una pequeña población a 50 kilómetros de París, con la intención de hacer una casa para él y su esposa Olga. La vivienda debería poder compaginar la vida privada con recepciones y encuentros con artistas, por lo cual Aalto debía diseñar espacios que permitieran no solo habitar la vivienda, sino también mostrar obras de arte, piedras preciosas, esculturas, etc. Además, Louis Carré era una amante de la lectura, y poseía una gran colección de libros, por lo cual requiere una biblioteca con un buen espacio de lectura donde estudiar. Louis Carré, le dio completa libertad a Aalto para que hiciera su mejor trabajo, solo le pidió que la casa fuera "pequeña por fuera y grande por dentro" (Lahti 2009)



Figura 14: Maison Louis Carré en construcción. Fuente: ver Tabla 18.

Aalto implantó la vivienda en el punto más alto del terreno, dándole una jerarquía notable sobre el paisaje circundante, luego para resolver el desnivel entre la casa y el bosque, decidió crear terrazas de la misma forma que las hizo en el Ayuntamiento de

Säynätsalo, dándole oportunidad de diseñar en esa área un pequeño anfiteatro. (Lahti 2009)

Esa forma de implantación, en lo alto de una colina, los techos en pendiente cuyas líneas imaginarias se pierden en el paisaje y la monumentalidad de la obra, hacen notar en su diseño una notable influencia de su Casa Experimental de Muuratsalo. En ambas hay una fuerte reminiscencia de la cultura mediterránea, y no es de extrañar, ambos Alvar Aalto y Louis Carré eran amantes de la arquitectura clásica, no fue casualidad que se conocieran en Venecia. (Jetsonen, Jetsonen y Pallasmaa 2011)



Figura 15: Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.

El entorno de la Maison Louis Carré es similar al de la Villa Mairea, una parcela rodeada de un hermoso paisaje campestre, y de la misma forma que en dicha obra, para maximizar esa relación entre la arquitectura y el entorno natural, dotó a la vivienda de un pequeño viñero aledaño. (Lahti 2009)

El techo de la vivienda, que de forma elegante desciende hacia el bosque en una pendiente constante, está cubierto de pizarra negra azulada, procedente de una cantera de la zona. Todas las paredes exteriores están pintadas de blanco, al igual que las estructuras de madera que también componen parte de la fachada. (Lahti 2009).

La casa resalta por la limpieza y naturalidad de los materiales elegidos para su construcción. Sus paredes de ladrillos lavados con cal, sus revestimientos de piedras extraídas de la cercana localidad de Chartres, mármol, cobre y madera que aportan calidez y elegancia a todos los espacios interiores. (Jetsonen, Jetsonen y Pallasmaa 2011).

Esto nos habla de la preocupación de Aalto por la sostenibilidad, al utilizar materiales locales cuya huella de carbono producto de transporte es muy reducida, quizá para la época sus decisiones de diseño eran más producto de la mente de un hombre que nació en el campo y que siempre estuvo en contacto con la naturaleza, que la de un técnico ambientalista. Sus allegados relatan que en sus viajes por Europa se interesaba más por la arquitectura vernácula, que por las obras modernas. Algunos llegaron a decir de él que en su carácter parecía el de un campesino, dado ese amor por lo rústico, pero que a la vez poseía un gusto muy refinado para valorar toda expresión artística. (Fernández-Galiano 2020)

El vestíbulo principal es un espacio impresionante, de un alto refinamiento, que trasmite al visitante la sensación de estar entrando a un lugar sagrado (Lahti 2009). Y es que al entrar lo primero que se percibe es un techo abovedado por una elegante ondulación de listones de pino procedente de la Laponia finlandesa. (Jetsonen, Jetsonen y Pallasmaa 2011). Del vestíbulo, una amplia escalera desciende al salón rodeado de paredes iluminadas concebidas para la exposición de obras de arte. Dicha escalera, según Aalto posee las mismas dimensiones que una de las escaleras de Versalles. (Lahti 2009). Este



Figura 16: Acceso lateral, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.

espacio articula el resto de los espacios de la vivienda. En su centro hay una chimenea, situada frente a una ventana panorámica en forma de arco. Sus paredes lucen pinturas de Raoul Dufy, Fernand Leger y Paul Klee elegidas especialmente por Louis y Olga Carré para su hogar. (Jetsonen, Jetsonen y Pallasmaa 2011)

A su lado la biblioteca se separa de la sala por un estante de libros. Aalto diseña una pequeña escalinata en descenso al área de lectura, que le otorga la intimidad requerida para concentrarse en la lectura. También en planta baja se encuentran los dormitorios principales y una habitación para invitados. Cada habitación en planta baja tiene su respectivo baño con sauna y acceso a jardín. El primer piso está ocupado cuatro habitaciones para el personal de servicio. (Jetsonen, Jetsonen y Pallasmaa 2011).



Figura 17: Vestíbulo, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.

A un lado de las habitaciones en planta baja, unos escalones más abajo adaptándose a la topografía del terreno, se encuentra el comedor, la cocina y los espacios para las tareas domésticas. (Lahti 2009)

La vivienda está repleta de detalles diseñados por Aalto, se han contabilizado casi 200 elementos de diseño como manillas, estanterías, lámparas y muebles, que hace de la casa una auténtica obra de arte en sí misma. En 1996 la Maison Louis Carré fue declarada patrimonio nacional (Lahti 2009). En 2006 La Fundación Cultural Finlandesa compró el edificio y lo donó a la Asociación Alvar Aalto en Francia. (Jetsonen, Jetsonen y Pallasmaa 2011).

4. CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS VIVIENDAS TOMADAS COMO CASO DE ESTUDIO.

En el presente trabajo de investigación se tomarán y estudiarán en profundidad dos de las obras antes mencionadas, Casa Experimental en Muuratsalo, Finlandia, y la Maison Louis Carré, Bazoches Sur Guyonne, Francia. Dicha elección fue motivada por dos aspectos importantes a tener en cuenta: el primero, que las dos obras son viviendas y el segundo, que se encuentran en zonas climáticas muy distintas, esto nos permitirá evaluar el comportamiento de estas dos obras de Aalto en el clima extremo de Finlandia, y el clima más templado de Francia.



Figura 18 - Mapa de localización de las distintas obras de Alvar Aalto en Europa. Fuente: (Lahti 2009). Adaptada por el autor.

4.1. LOCALIZACIÓN

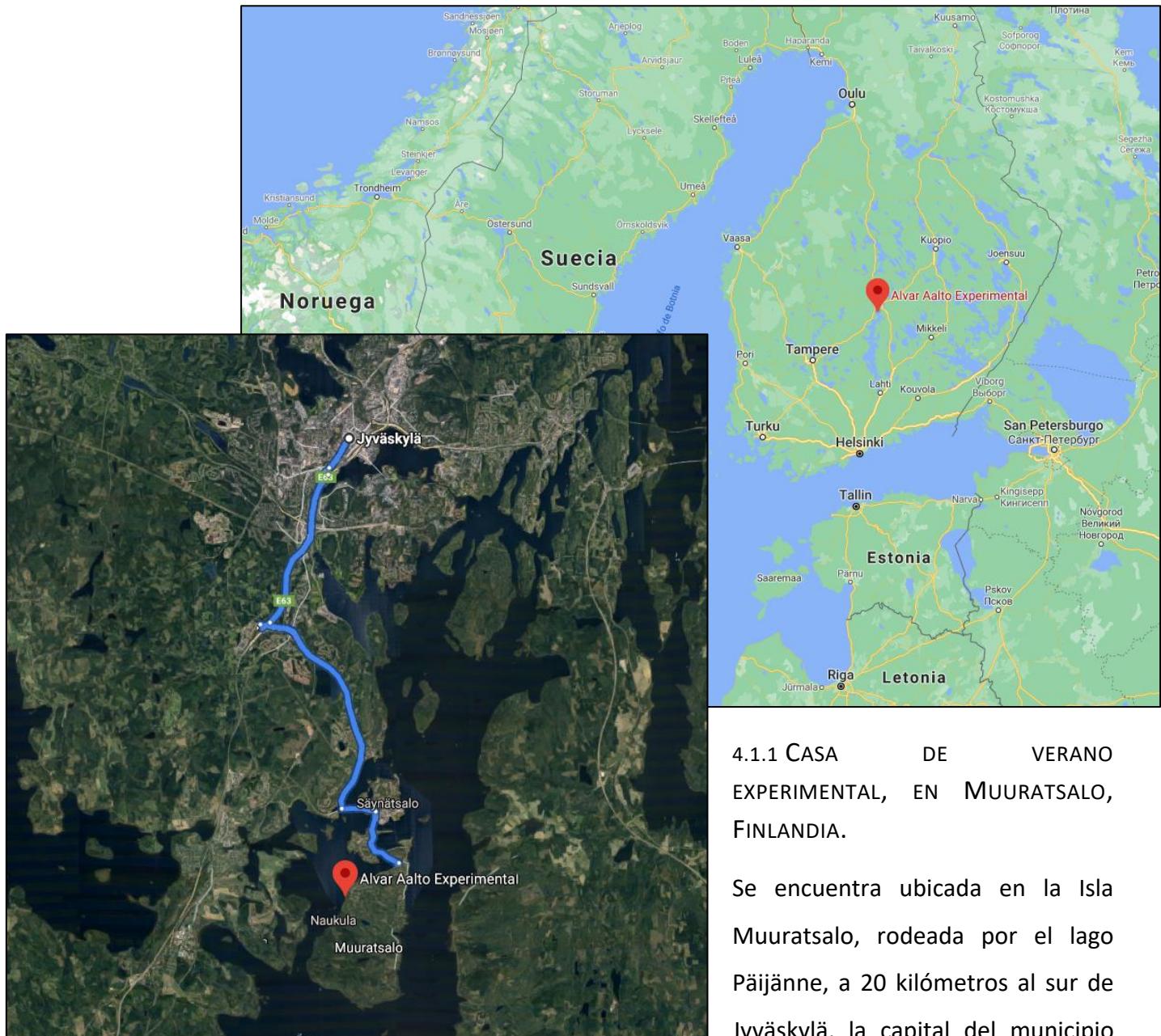


Figura 19: Localización de Casa de verano experimental de Muuratsalo.
Fuente: Google Earth.

ubicado en el centro del país. Exactamente la vivienda se encuentra en las siguientes coordenadas: Latitud: 62°6'53.46" Norte, Longitud: 25°44'41.40" Este.

4.1.1 CASA DE VERANO EXPERIMENTAL, EN MUURATSALO, FINLANDIA.

Se encuentra ubicada en la Isla Muuratsalo, rodeada por el lago Päijänne, a 20 kilómetros al sur de Jyväskylä, la capital del municipio finlandés del mismo nombre,

4.1.2 MAISON LOUIS CARRÉ, BAZOCHE SUR GUYONNE, FRANCIA.

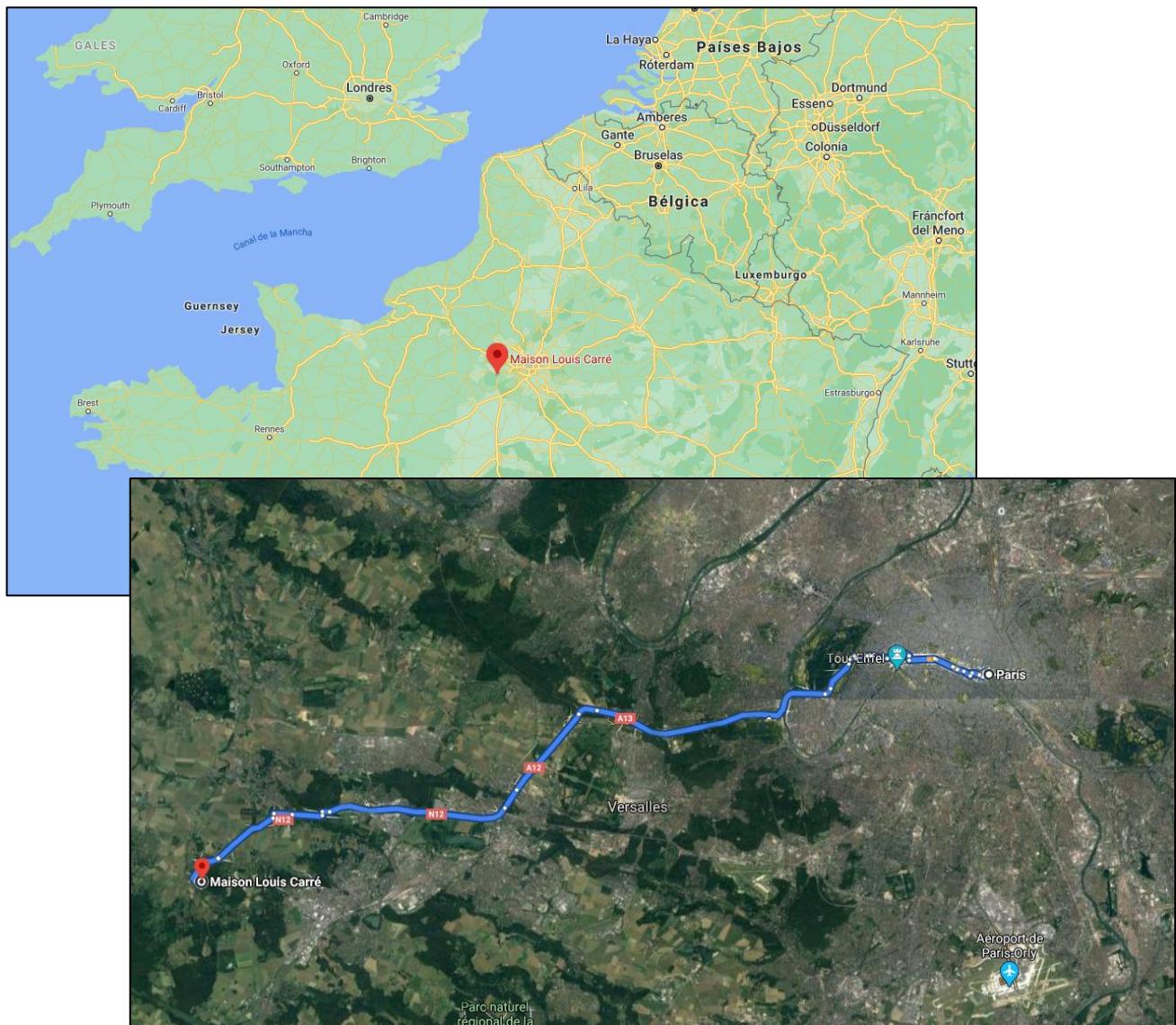


Figura 20: Localización de la Maison Louis Carré. Fuente: Google Earth.

La Maison Louis Carré se encuentra ubicada a 45 Km al oeste del centro de París, y a unos 20 Km de Versalles, en Bazoches-sur-Guyonne, una población y comuna francesa, en la región de Isla de Francia, perteneciente al departamento de Yvelines, en el distrito de Rambouillet y cantón de Montfort-l'Amaury. (L'Institut national de la statistique et des études économiques 2015). Su ubicación en coordenadas geográficas es la siguiente: Latitud 48°46'12.06" Norte, Longitud 1°51'14.94" Este.

5. ANÁLISIS CLIMÁTICOS DE LOS DISTINTOS EMPLAZAMIENTOS.

Para realizar el presente análisis se ha tomado como referencia los datos obtenidos de la base de datos climáticos disponible en <http://climate.onebuilding.org/>.

En dicha página describen la metodología que utilizan para obtener los datos de la siguiente forma, traduzco:

“Este sitio contiene datos climáticos diseñados específicamente para realizar simulaciones en edificaciones... los archivos son Años Meteorológicos Típicos (TMY)... El formato principal de los archivos es "EPW"... Formato Meteorológico EnergyPlus... Los archivos TMYx son datos meteorológicos típicos derivados de datos meteorológicos horarios hasta el 2018 obtenidos de ISD (US NOAA's Integrated Surface Database) utilizando la metodología TMY/ISO 15927-4:2005.” (Lawrie, Linda y Drury 2019)

Por lo cual se asume que los datos son válidos y fiables. Se utilizaron los datos climáticos de las estaciones climáticas más cercanas a cada emplazamiento. En el caso de la casa de experimental, en Muuratsalo, se utilizaron los datos de la estación climática del aeropuerto de Jyväskylä a unos 20 km al norte de la vivienda, y en el caso de la Maison Louis Carré, se utilizaron los datos del aeropuerto de París Orly, ubicado al sur de la ciudad, el más cercano a la vivienda, a unos 40 km al este de esta.

Para interpretar los datos descargados en los archivos EPW, se han utilizado en software Climate Consultant 6.0, disponible en el siguiente enlace: <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>. Dicho software permite exportar los datos climáticos a formato CSV, el cual es compatible con Microsoft Excel. Esto permitió operar con los datos de una forma más versátil, filtrando los datos para distintas estaciones, separando los datos para diurnos y nocturnos, obtener los

vientos más frecuentes en relación con su velocidad y realizar gráficos personalizados para visualizar los resultados. A continuación, se expondrán los resultados obtenidos para ambos emplazamientos:

5.1. TEMPERATURA Y HUMEDAD

5.1.1 TEMPERATURA Y HUMEDAD EN JYVÄSKYLÄ, FINLANDIA. (CASA EXPERIMENTAL MUURATSALO)

Media y Promedio Anual de Temperaturas y Humedad - Jyväskylä			
Temperatura	Bulbo Seco	Bulbo húmedo	Humedad Relativa
Mínima	-23,70 °C	-23,98 °C	14,00 % Máxima Sequía
Media Fría	-2,20 °C	-3,03 °C	72,00 % Media Seca
Media	3,90 °C	2,71 °C	89,00 % Media
Media Cálida	12,00 °C	9,72 °C	96,00 % Media Húmeda
Máxima	26,10 °C	19,93 °C	100,00 % Máxima Humedad
Promedio 10% Más Frías	-15,90 °C	-16,18 °C	33,08 % Promedio 10% Más Secas
Promedio Fría	-3,56 °C	-4,21 °C	67,66 % Promedio Secas
Promedio	4,24 °C	2,68 °C	81,55 % Promedio
Promedio Cálida	12,03 °C	9,58 °C	95,45 % Promedio Húmedas
Promedio 10% Más Cálidas	20,64 °C	15,79 °C	100,00 % Promedio 10% Más Húmedas

Tabla 1: Media y promedio anual de temperaturas y humedad relativa en la región de Jyväskylä.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Por medio de Excel, se calcularon la media, el promedio, las máximas y las mínimas de la temperatura anual, dicho resumen se vació en la Tabla 1, en donde podemos observar que las temperaturas en Jyväskylä pueden bajar hasta -23,70 °C, esto representa 27,6 °C menos con respecto a la temperatura media anual (3,90 °C) y casi 50 °C menos con respecto a la máxima temperatura del año que registró 26,10 °C, temperatura que realmente no lo podemos considerar cálida ya que se encuentra muy cerca de los 25 °C, la temperatura templada que se considera ideal para el confort del ser humano. Por lo cual podemos clasificar este clima como eminentemente frío, y no es de extrañar dada la latitud a la cual se encuentra este emplazamiento, su cercanía con el círculo polar

ártico y lo alejado que se encuentra de la costa de Mar Báltico que, como todos los mares, ayuda a regular las temperaturas y evita que sean tan extremas. Pero justamente esta peculiaridad del emplazamiento hace de esta zona un buen lugar para tener una casa de verano en Finlandia, porque juntamente su lejanía de la costa hace que, de la misma forma que las temperaturas sean extremadamente frías en invierno, hacen que en verano sean las más cálidas de todo el país. Este dato nos ha permitido entender por qué Aalto decidió hacer su casa de verano en esta zona y no en la costa como estamos acostumbrados en los países mediterráneos, simplemente porque Jyväskylä es la zona que, en verano, tiene las temperaturas más cálidas, gracias al efecto de la

continentalidad. Por lo cual, considerando que esta vivienda es de uso estacional, considero que Aalto tuvo un gran acierto al hacer esta elección tomando en cuenta el resto de las opciones que tenía. Y es que además el paisaje de Jyväskylä tiene una excepcional belleza natural.



Figura 21: Verano en Muuratsalo, Jyväskylä, Finlandia. Fuente: ver Tabla 18.

A continuación, se presentan dos tablas resumen, en la primera se detalla la temperatura y humedad relativa en Jyväskylä mes a mes, y en la segunda, se muestran las medias en cada estación, con sus valores diurnos y nocturnos:

Media y Promedio Mensual de Temperaturas y Humedad Jyväskylä											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
-23,70 °C	-23,00 °C	-20,50 °C	-16,20 °C	-3,60 °C	1,00 °C	1,70 °C	4,20 °C	-1,90 °C	-6,50 °C	-10,40 °C	-21,00 °C
-11,35 °C	-11,00 °C	-6,40 °C	0,30 °C	5,95 °C	11,00 °C	12,80 °C	12,20 °C	7,70 °C	0,40 °C	-1,00 °C	-5,00 °C
-6,30 °C	-6,00 °C	-2,70 °C	3,40 °C	9,70 °C	13,00 °C	15,60 °C	14,40 °C	10,50 °C	4,90 °C	0,35 °C	-2,00 °C
-4,10 °C	-2,90 °C	0,00 °C	5,85 °C	13,20 °C	16,60 °C	19,10 °C	16,70 °C	13,00 °C	8,25 °C	2,90 °C	0,10 °C
4,60 °C	7,20 °C	14,20 °C	23,00 °C	24,00 °C	26,10 °C	22,50 °C	20,60 °C	13,80 °C	7,80 °C	3,00 °C	Maxima
-20,58 °C	-20,94 °C	-16,81 °C	-9,42 °C	-1,47 °C	4,59 °C	6,56 °C	6,34 °C	0,67 °C	-4,70 °C	-6,11 °C	-15,91 °C
-11,89 °C	-11,94 °C	-7,52 °C	-0,82 °C	5,22 °C	10,37 °C	12,17 °C	11,55 °C	7,00 °C	0,34 °C	-1,81 °C	-6,48 °C
-7,32 °C	-7,09 °C	-3,67 °C	2,89 °C	9,51 °C	13,65 °C	15,72 °C	14,31 °C	10,26 °C	4,33 °C	0,58 °C	-3,08 °C
-2,76 °C	-2,25 °C	0,19 °C	6,60 °C	13,80 °C	16,92 °C	19,27 °C	17,08 °C	13,52 °C	8,31 °C	2,96 °C	0,31 °C
3,66 °C	2,33 °C	4,47 °C	11,93 °C	20,30 °C	22,17 °C	23,63 °C	20,94 °C	18,01 °C	12,10 °C	5,99 °C	2,44 °C
-23,98 °C	-23,28 °C	-20,78 °C	-16,48 °C	-4,06 °C	0,17 °C	1,51 °C	4,01 °C	-2,09 °C	-6,96 °C	-10,68 °C	-21,28 °C
-11,63 °C	-11,58 °C	-6,94 °C	-1,27 °C	2,93 °C	8,74 °C	10,84 °C	11,02 °C	6,65 °C	-0,45 °C	-1,46 °C	-5,28 °C
-6,59 °C	-6,07 °C	-3,89 °C	1,81 °C	5,49 °C	10,89 °C	13,36 °C	13,08 °C	9,07 °C	3,81 °C	0,18 °C	-2,00 °C
-4,29 °C	-3,04 °C	-1,73 °C	4,28 °C	8,94 °C	12,64 °C	14,88 °C	14,60 °C	10,90 °C	7,16 °C	2,71 °C	0,00 °C
3,86 °C	3,54 °C	2,63 °C	8,36 °C	16,83 °C	19,93 °C	17,43 °C	17,54 °C	16,38 °C	12,24 °C	7,80 °C	3,00 °C
-20,86 °C	-21,22 °C	-17,04 °C	-9,85 °C	-2,41 °C	3,38 °C	5,31 °C	5,93 °C	0,49 °C	-5,32 °C	-6,42 °C	-16,19 °C
-12,17 °C	-12,28 °C	-8,26 °C	-2,16 °C	2,34 °C	8,08 °C	10,32 °C	10,44 °C	6,01 °C	-0,77 °C	-2,16 °C	-6,78 °C
-7,59 °C	-7,48 °C	-4,88 °C	1,07 °C	5,85 °C	10,58 °C	12,60 °C	12,61 °C	8,66 °C	3,20 °C	0,28 °C	-3,35 °C
-3,01 °C	-2,68 °C	-1,50 °C	4,30 °C	9,36 °C	13,08 °C	14,89 °C	14,77 °C	11,30 °C	7,17 °C	2,73 °C	0,07 °C
3,30 °C	1,96 °C	1,61 °C	6,87 °C	14,20 °C	16,72 °C	16,70 °C	16,82 °C	14,57 °C	10,72 °C	5,73 °C	2,14 °C
56,00%	59,00%	28,00%	15,00%	14,00%	26,00%	29,00%	42,00%	40,00%	31,00%	65,00%	77,00%
90,00%	84,00%	63,00%	60,00%	41,00%	56,00%	56,00%	73,00%	74,00%	77,00%	92,50%	92,00%
93,00%	91,00%	80,00%	78,00%	59,00%	76,00%	75,50%	90,00%	88,00%	87,00%	93,00%	93,00%
97,00%	92,00%	92,00%	95,00%	84,00%	91,00%	94,00%	97,00%	97,00%	94,00%	100,00%	100,00%
100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
79,26%	70,80%	35,29%	26,11%	22,16%	29,92%	35,13%	49,00%	49,51%	51,11%	75,32%	82,58%
88,98%	83,06%	61,56%	56,94%	40,70%	53,53%	55,27%	72,19%	71,33%	74,13%	90,11%	90,32%
92,84%	88,77%	76,40%	74,95%	61,25%	71,63%	73,30%	84,22%	83,40%	83,70%	94,74%	94,10%
96,69%	94,49%	91,23%	92,96%	81,80%	89,74%	91,32%	96,24%	95,47%	93,27%	99,37%	97,87%
99,61%	100,00%	100,00%	98,39%	100,00%	99,37%	99,05%	99,08%	97,08%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 2: Media, Promedio, Máxima y Mínima de Temperaturas y Humedad mensuales en Jyväskylä, Finlandia.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Media y Promedio por Estaciones de Temperaturas y Humedad separando temperaturas diurnas y nocturnas - Jyväskylä											
Invierno			Primavera			Verano			Otoño		
Día	24H	Noche	Día	24H	Noche	Día	24H	Noche	Día	24H	Noche
-22,30 °C	-23,70 °C	-23,70 °C	-18,90 °C	-20,50 °C	-20,50 °C	-1,90 °C	-1,90 °C	-0,80 °C	-15,00 °C	-21,00 °C	-21,00 °C
-7,60 °C	-8,70 °C	-9,10 °C	3,70 °C	1,90 °C	-1,75 °C	12,70 °C	11,30 °C	9,25 °C	-0,05 °C	-0,90 °C	-1,10 °C
-4,00 °C	-5,00 °C	-5,60 °C	9,10 °C	7,00 °C	3,20 °C	15,20 °C	14,00 °C	11,80 °C	3,15 °C	1,40 °C	1,00 °C
-1,00 °C	-2,00 °C	-2,40 °C	13,40 °C	12,00 °C	7,25 °C	18,40 °C	17,00 °C	14,10 °C	7,90 °C	6,10 °C	4,60 °C
4,50 °C	4,60 °C	4,60 °C	24,00 °C	24,00 °C	18,00 °C	26,10 °C	26,10 °C	20,40 °C	17,60 °C	17,60 °C	12,20 °C
-18,28 °C	-19,99 °C	-20,42 °C	-8,19 °C	-10,99 °C	-13,33 °C	5,90 °C	3,75 °C	1,78 °C	-7,30 °C	-10,90 °C	-12,29 °C
-9,02 °C	-10,37 °C	-10,93 °C	2,70 °C	0,41 °C	-2,81 °C	11,95 °C	10,59 °C	8,42 °C	-0,74 °C	-2,04 °C	-2,55 °C
-4,85 °C	-5,96 °C	-6,47 °C	8,35 °C	6,49 °C	2,63 °C	15,29 °C	14,06 °C	11,36 °C	3,79 °C	2,11 °C	1,30 °C
-0,65 °C	-1,55 °C	-2,00 °C	14,01 °C	12,56 °C	8,07 °C	18,63 °C	17,53 °C	14,30 °C	8,32 °C	6,26 °C	5,14 °C
3,56 °C	3,15 °C	2,83 °C	20,49 °C	19,81 °C	15,02 °C	22,99 °C	22,61 °C	17,45 °C	13,89 °C	12,31 °C	10,66 °C
-22,58 °C	-23,98 °C	-23,98 °C	-19,09 °C	-20,78 °C	-20,78 °C	-2,09 °C	-2,09 °C	-0,99 °C	-15,28 °C	-21,28 °C	-21,28 °C
-7,98 °C	-9,07 °C	-9,56 °C	1,69 °C	0,66 °C	-2,59 °C	10,37 °C	9,67 °C	8,13 °C	-0,88 °C	-1,33 °C	-1,54 °C
-4,68 °C	-5,39 °C	-5,89 °C	5,28 °C	4,23 °C	1,86 °C	12,81 °C	12,30 °C	10,84 °C	2,24 °C	0,96 °C	0,58 °C
-2,00 °C	-2,67 °C	-3,00 °C	9,44 °C	8,43 °C	5,13 °C	14,58 °C	14,14 °C	13,22 °C	6,95 °C	5,11 °C	4,09 °C
3,61 °C	3,86 °C	3,86 °C	19,93 °C	19,93 °C	16,00 °C	17,78 °C	17,78 °C	16,40 °C	13,83 °C	13,83 °C	11,61 °C
-18,57 °C	-20,26 °C	-20,70 °C	-8,98 °C	-11,52 °C	-13,64 °C	5,08 °C	3,36 °C	1,53 °C	-7,64 °C	-11,15 °C	-12,53 °C
-9,45 °C	-10,70 °C	-11,22 °C	0,45 °C	-1,16 °C	-3,85 °C	9,90 °C	9,05 °C	7,52 °C	-1,41 °C	-2,47 °C	-2,94 °C
-5,58 °C	-6,48 °C	-6,89 °C	5,09 °C	3,84 °C	1,24 °C	12,30 °C	11,68 °C	10,34 °C	2,79 °C	1,47 °C	0,83 °C
-1,70 °C	-2,26 °C	-2,55 °C	9,73 °C	8,83 °C	6,34 °C	14,70 °C	14,31 °C	13,16 °C	7,00 °C	5,42 °C	4,60 °C
2,14 °C	2,32 °C	2,38 °C	15,32 °C	14,89 °C	13,42 °C	16,86 °C	16,68 °C	15,51 °C	11,99 °C	10,99 °C	10,13 °C
28,00%	28,00%	36,00%	14,00%	14,00%	26,00%	29,00%	29,00%	38,00%	31,00%	31,00%	41,00%
79,00%	84,00%	87,00%	42,00%	51,00%	67,00%	58,00%	64,00%	84,00%	79,00%	86,00%	90,00%
90,00%	92,00%	92,00%	65,00%	72,00%	84,00%	74,00%	83,00%	93,00%	91,00%	93,00%	95,00%
93,00%	96,00%	96,00%	87,00%	91,00%	94,00%	93,00%	95,00%	97,00%	98,00%	99,00%	99,00%
100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
43,06%	52,06%	58,96%	23,4%	25,31%	41,73%	36,08%	37,98%	60,81%	52,38%	60,46%	68,86%
74,29%	80,67%	83,72%	43,49%	49,61%	65,43%	57,09%	63,14%	81,54%	76,43%	83,11%	86,60%
84,41%	88,09%	89,78%	64,51%	69,45%	79,55%	73,61%	78,48%	89,19%	86,35%	90,43%	92,42%
94,56%	95,51%	95,84%	85,53%	89,29%	93,87%	90,15%	93,83%	96,86%	96,28%	97,76%	98,25%
100,00%	100,00%	100,00%	99,93%	100,00%	100,00%	99,22%	99,22%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 3: Media, Promedio, Máxima y Mínima de Temperaturas y Humedad, diurnas y nocturnas por estaciones en Jyväskylä, Finlandia.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

5.1.2 TEMPERATURA Y HUMEDAD EN PARÍS, FRANCIA. (MAISON LOUIS CARRÉ)

Media y Promedio Anual de Temperaturas y Humedad - París			
Temperatura	Bulbo Seco	Bulbo húmedo	Humedad Relativa
Mínima	-7,20 °C	-7,39 °C	22,00 % Máxima Sequía
Media Fría	6,50 °C	5,21 °C	64,00 % Media Seca
Media	11,70 °C	9,74 °C	81,00 % Media
Media Cálida	17,20 °C	13,87 °C	90,00 % Media Húmeda
Máxima	33,40 °C	22,47 °C	100,00 % Máxima Humedad
Promedio 10% Más Frías	-0,81 °C	-1,46 °C	37,42 % Promedio 10% Más Secas
Promedio Fría	6,10 °C	4,80 °C	62,59 % Promedio Secas
Promedio	12,01 °C	9,47 °C	76,29 % Promedio
Promedio Cálida	17,91 °C	14,14 °C	89,99 % Promedio Húmedas
Promedio 10% Más Cálidas	26,73 °C	19,44 °C	97,28 % Promedio 10% Más Húmedas

Tabla 4: Media y promedio anual de temperaturas y humedad relativa en París.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

De la misma forma que el emplazamiento anterior, se realizó un resumen de las temperaturas medias, promedio, mínimas y máximas de París. En este caso, podemos observar que las temperaturas en invierno no son tan extremas como en Finlandia, pero pueden llegar a un mínimo de -7,20 °C, pero en promedio, si agrupamos el 10% de las temperaturas más frías, obtenemos que la temperatura más baja suele rondar los -0,81 °C, por lo que, definitivamente, es un invierno en comparación más benigno. La media de las temperaturas calidad es de 17,20 °C, pero en verano, pueden llegar hasta los 33,40 °C, algo a tener en cuenta ya que, algunas edificaciones no se diseñan para lidiar con altas temperaturas, y pueden llegar a acumular, en verano, más calor del requerido.

A continuación, se presentan dos tablas resumen, en la primera se detalla la temperatura y humedad relativa en París mes a mes, y en la segunda, se muestran las medias en cada estación, con sus valores diurnos y nocturnos:

Media y Promedio Mensual de Temperaturas y Humedad - París											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
-6,10 °C	-7,20 °C	-1,60 °C	1,70 °C	4,20 °C	5,70 °C	11,10 °C	7,70 °C	7,90 °C	-0,60 °C	-3,70 °C	-3,00 °C
1,90 °C	1,30 °C	5,40 °C	8,60 °C	11,90 °C	14,50 °C	18,40 °C	16,20 °C	13,60 °C	9,70 °C	4,80 °C	1,70 °C
5,00 °C	4,15 °C	7,50 °C	11,20 °C	14,85 °C	17,60 °C	21,00 °C	18,85 °C	16,20 °C	13,25 °C	8,50 °C	5,20 °C
7,30 °C	6,55 °C	10,50 °C	13,95 °C	18,25 °C	21,00 °C	23,90 °C	22,00 °C	18,95 °C	15,70 °C	10,50 °C	8,45 °C
15,10 °C	14,20 °C	19,30 °C	26,70 °C	31,10 °C	33,40 °C	32,10 °C	28,90 °C	28,00 °C	16,80 °C	15,40 °C	13,64 °C
-2,40 °C	-3,81 °C	0,32 °C	3,98 °C	6,36 °C	9,81 °C	13,24 °C	10,15 °C	9,71 °C	2,16 °C	-0,42 °C	-1,78 °C
1,77 °C	0,86 °C	4,80 °C	8,12 °C	11,44 °C	14,29 °C	17,92 °C	15,52 °C	13,41 °C	9,02 °C	4,56 °C	1,77 °C
4,74 °C	3,85 °C	7,78 °C	11,35 °C	15,33 °C	17,97 °C	21,35 °C	18,98 °C	16,46 °C	12,76 °C	7,66 °C	5,23 °C
7,70 °C	6,84 °C	10,77 °C	14,58 °C	19,21 °C	21,66 °C	24,78 °C	22,44 °C	19,51 °C	16,49 °C	10,77 °C	8,70 °C
11,78 °C	10,77 °C	15,56 °C	21,16 °C	25,82 °C	28,44 °C	31,31 °C	27,89 °C	24,56 °C	24,03 °C	14,61 °C	13,64 °C
-6,38 °C	-7,39 °C	-0,05 °C	3,21 °C	5,24 °C	10,01 °C	10,15 °C	7,38 °C	7,62 °C	-0,74 °C	-4,26 °C	-3,28 °C
1,02 °C	0,47 °C	3,75 °C	6,87 °C	9,30 °C	11,99 °C	14,54 °C	13,29 °C	11,74 °C	8,34 °C	4,05 °C	1,12 °C
4,23 °C	2,86 °C	5,29 °C	8,86 °C	11,72 °C	13,66 °C	16,08 °C	15,35 °C	13,27 °C	11,39 °C	7,57 °C	3,99 °C
6,25 °C	5,44 °C	7,58 °C	10,52 °C	14,77 °C	15,93 °C	17,94 °C	17,39 °C	14,84 °C	13,51 °C	9,41 °C	7,05 °C
12,29 °C	10,21 °C	13,14 °C	19,38 °C	20,50 °C	22,11 °C	22,47 °C	22,46 °C	18,31 °C	17,99 °C	12,96 °C	12,99 °C
-3,38 °C	-4,19 °C	-0,26 °C	2,70 °C	4,76 °C	8,55 °C	11,35 °C	9,22 °C	8,84 °C	1,88 °C	-0,98 °C	-2,19 °C
0,93 °C	0,01 °C	3,22 °C	6,48 °C	8,90 °C	11,67 °C	14,25 °C	12,96 °C	11,52 °C	7,68 °C	3,66 °C	1,03 °C
3,82 °C	2,74 °C	5,50 °C	8,80 °C	11,88 °C	13,99 °C	16,22 °C	15,38 °C	13,30 °C	10,73 °C	6,60 °C	4,22 °C
6,71 °C	5,47 °C	7,79 °C	11,11 °C	14,86 °C	16,31 °C	18,19 °C	17,80 °C	15,08 °C	13,77 °C	9,55 °C	7,40 °C
10,82 °C	8,61 °C	11,15 °C	16,02 °C	18,99 °C	20,70 °C	21,18 °C	21,05 °C	17,48 °C	16,70 °C	12,15 °C	12,06 °C
43,00%	34,00%	26,00%	33,00%	33,00%	29,00%	22,00%	30,00%	32,00%	28,00%	42,00%	60,00%
83,00%	77,00%	61,00%	55,50%	53,00%	49,00%	58,00%	59,00%	72,00%	83,00%	82,00%	82,00%
89,00%	88,00%	95,00%	87,00%	84,50%	83,00%	76,00%	87,00%	86,00%	93,00%	94,00%	88,00%
94,00%	94,00%	100,00%	99,00%	98,00%	96,00%	97,00%	98,00%	97,00%	100,00%	99,00%	92,00%
97,00%	97,00%	99,11%	96,11%	95,97%	94,50%	95,27%	93,82%	96,26%	95,95%	98,00%	96,05%

Tabla 5: Media, Promedio, Máxima propia, Mínima y Humedad mensuales en París, Francia.
Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Media y Promedio por Estaciones de Temperaturas y Humedad separando temperaturas diurnas y nocturnas -París											
Invierno			Primavera			Verano			Otoño		
Dia	24H	Noche	Dia	24H	Noche	Dia	24H	Noche	Dia	24H	Noche
-3,70 °C	-7,20 °C	-7,20 °C	1,40 °C	-1,30 °C	-1,30 °C	7,30 °C	5,70 °C	5,70 °C	-1,10 °C	-3,70 °C	-3,70 °C
3,40 °C	1,80 °C	1,10 °C	11,90 °C	10,10 °C	7,90 °C	17,80 °C	16,00 °C	13,60 °C	8,40 °C	6,10 °C	5,00 °C
6,50 °C	5,00 °C	4,10 °C	15,20 °C	13,30 °C	11,10 °C	20,70 °C	18,90 °C	16,50 °C	11,80 °C	9,90 °C	9,00 °C
9,20 °C	7,60 °C	6,70 °C	19,00 °C	17,20 °C	13,80 °C	23,60 °C	22,05 °C	19,00 °C	16,20 °C	13,70 °C	11,80 °C
19,30 °C	19,30 °C	14,40 °C	31,10 °C	24,30 °C	24,30 °C	33,40 °C	33,40 °C	27,00 °C	28,00 °C	28,00 °C	22,00 °C
-1,11 °C	-2,90 °C	-3,57 °C	5,57 °C	3,77 °C	2,59 °C	12,41 °C	10,33 °C	9,09 °C	1,95 °C	0,29 °C	-0,13 °C
3,08 °C	1,61 °C	0,87 °C	11,32 °C	9,45 °C	7,57 °C	17,39 °C	15,42 °C	13,43 °C	7,76 °C	5,80 °C	4,73 °C
6,37 °C	4,88 °C	3,91 °C	15,68 °C	13,83 °C	11,08 °C	20,82 °C	19,09 °C	16,41 °C	12,28 °C	10,05 °C	8,53 °C
9,66 °C	8,16 °C	6,96 °C	20,05 °C	18,21 °C	14,59 °C	24,25 °C	22,75 °C	19,40 °C	16,82 °C	14,30 °C	12,33 °C
15,04 °C	13,35 °C	11,20 °C	27,49 °C	26,54 °C	20,66 °C	30,48 °C	29,42 °C	23,91 °C	24,44 °C	21,99 °C	17,05 °C
-3,92 °C	-7,39 °C	-7,39 °C	-0,05 °C	-1,76 °C	-1,76 °C	6,84 °C	5,24 °C	5,24 °C	-1,93 °C	-4,26 °C	-4,26 °C
1,84 °C	1,01 °C	0,52 °C	8,77 °C	7,84 °C	6,35 °C	13,65 °C	12,97 °C	11,74 °C	6,72 °C	5,21 °C	4,21 °C
4,93 °C	3,82 °C	2,94 °C	11,53 °C	10,63 °C	9,34 °C	15,56 °C	14,93 °C	14,04 °C	9,96 °C	8,75 °C	8,02 °C
6,78 °C	6,04 °C	5,42 °C	14,92 °C	13,74 °C	11,91 °C	17,49 °C	17,08 °C	15,98 °C	13,06 °C	11,92 °C	10,67 °C
12,29 °C	12,43 °C	12,43 °C	22,17 °C	22,17 °C	19,96 °C	22,47 °C	22,47 °C	21,77 °C	17,99 °C	17,99 °C	15,91 °C
-2,04 °C	-3,44 °C	-4,02 °C	4,03 °C	2,68 °C	1,63 °C	10,74 °C	9,13 °C	8,29 °C	1,12 °C	-0,25 °C	-0,64 °C
1,84 °C	0,70 °C	0,11 °C	8,45 °C	7,38 °C	6,14 °C	13,48 °C	12,68 °C	11,62 °C	6,36 °C	4,85 °C	3,98 °C
4,49 °C	3,56 °C	2,95 °C	11,77 °C	10,77 °C	9,29 °C	15,65 °C	15,00 °C	14,00 °C	9,82 °C	8,42 °C	7,48 °C
7,14 °C	6,41 °C	5,78 °C	15,08 °C	14,16 °C	12,45 °C	17,82 °C	17,32 °C	16,38 °C	13,28 °C	12,00 °C	10,98 °C
10,49 °C	10,30 °C	9,91 °C	20,07 °C	19,41 °C	17,53 °C	21,03 °C	20,78 °C	20,09 °C	16,75 °C	15,98 °C	14,32 °C
26,00%	26,00%	45,00%	29,00%	29,00%	22,00%	39,00%	22,00%	39,00%	28,00%	28,00%	45,00%
67,00%	76,00%	82,00%	52,00%	58,00%	74,00%	47,00%	54,50%	70,00%	66,00%	78,00%	84,00%
81,00%	87,00%	89,00%	64,00%	74,00%	83,00%	59,00%	70,00%	80,00%	79,00%	87,00%	90,00%
90,00%	93,00%	94,00%	79,50%	86,50%	90,00%	75,00%	83,00%	88,00%	89,00%	93,00%	94,00%
100,00%	100,00%	100,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	98,00%	97,00%	100,00%	100,00%	100,00%
38,80%	45,51%	58,70%	36,93%	38,56%	51,16%	30,19%	32,15%	51,33%	39,47%	46,16%	63,15%
63,91%	72,50%	78,83%	51,52%	57,51%	71,58%	46,30%	52,75%	68,37%	63,68%	73,41%	81,45%
77,11%	82,60%	86,20%	65,53%	71,73%	80,93%	61,07%	67,87%	78,35%	76,37%	83,17%	87,79%
90,33%	92,71%	93,59%	79,55%	85,94%	90,28%	75,87%	83,00%	88,35%	89,10%	92,93%	94,14%
98,02%	98,01%	97,98%	94,72%	95,69%	96,09%	94,74%	95,50%	95,76%	97,80%	97,74%	97,68%

Tabla 6: Media, Promedio, Máxima propia, Mínima y Humedad, diurnas y nocturnas por estaciones en París, Francia.
Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

5.2. RADIACIÓN SOLAR

		Radiación Solar - Jyväskylä			Radiación Solar - París		
		Día	Duración del Día (Horas)	Radiación diaria (Wd/m2)	Día	Duración del Día (Horas)	Radiación diaria (Wd/m2)
Invierno	Mínima	23/12/2018	5:06:06	30 Wd/m2	27/12/2018	8:16:37	378 Wd/m2
	Media Fría			95 Wd/m2			787 Wd/m2
	Media	30/01/2018	7:20:40	233 Wd/m2	10/02/2018	9:54:06	1.269 Wd/m2
	Media Cálida			824 Wd/m2			1.891 Wd/m2
	Máxima	17/03/2018	11:51:46	2.599 Wd/m2	18/03/2018	12:00:18	4.372 Wd/m2
Primavera	Mínima	21/03/2018	12:15:41	1.295 Wd/m2	26/03/2018	12:29:09	1.912 Wd/m2
	Media Fría			2.727 Wd/m2			3.520 Wd/m2
	Media	03/05/2018	16:31:48	4.041 Wd/m2	10/05/2018	15:00:32	4.509 Wd/m2
	Media Cálida			5.264 Wd/m2			5.729 Wd/m2
	Máxima	20/06/2018	19:48:07	7.376 Wd/m2	07/06/2018	16:00:53	7.855 Wd/m2
Verano	Máxima	01/07/2018	19:37:53	7.316 Wd/m2	30/06/2018	16:06:45	7.927 Wd/m2
	Media Cálida			5.009 Wd/m2			5.935 Wd/m2
	Media	01/09/2018	14:24:45	4.053 Wd/m2	24/07/2018	15:27:20	4.864 Wd/m2
	Media Fría			3.283 Wd/m2			3.980 Wd/m2
	Mínima	11/09/2018	13:25:50	1.111 Wd/m2	16/09/2018	12:35:22	2.213 Wd/m2
Otoño	Máxima	21/09/2018	12:26:58	2.530 Wd/m2	22/09/2018	12:14:05	4.293 Wd/m2
	Media Cálida			877 Wd/m2			2.064 Wd/m2
	Media	04/11/2018	8:08:47	304 Wd/m2	03/11/2018	9:48:56	1.291 Wd/m2
	Media Fría			96 Wd/m2			892 Wd/m2
	Mínima	18/12/2018	5:07:49	30 Wd/m2	03/12/2018	8:32:00	586 Wd/m2

Tabla 7: Resumen Radiación solar emplazamientos Jyväskylä y París.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Utilizando los datos extraídos de los EWP de cada emplazamiento, descargados desde <http://climate.onebuilding.org/> (Lawrie, Linda y Drury 2019) y cruzando dicha información con la base de datos generada por la calculadora solar de <https://arachnoid.com/lutusp/sunrise/>, se ha obtenido la media de radiación solar diaria en Watios por metros cuadrados al día, o lo que es lo mismo, la sumatorio de los Watios por metro cuadrado que se registran a cada hora de cada día para obtener un total de radiación diario. Y como podemos observar en la Tabla 7, existe una clara relación entre la duración del día y la radiación solar registrada en cada emplazamiento. Como es lógico durante el invierno se registran los valores más bajos de radiación, que en el caso de Jyväskylä llegan a un extremo de solo 30 Wd/m2, es realmente bajo si los comparamos con los datos mínimos registrados en París, que se registraron el día 27/12/2018 con tan solo 378 Wd/m2, que aun siendo el valor más bajo para dicho

emplazamientos, es más de 10 veces la marca mínima de que se registra en Jyväskylä para la misma época del año, por lo cual podemos concluir que los inviernos en Jyväskylä además de ser fríos son extremadamente oscuros, y no es de extrañar si consideramos que en esa época del año el día solo dura 5:06:06 horas, y esto no se traduce necesariamente en 5 horas de sol, porque dependiendo de las condiciones meteorológicas, la insolación puede verse reducidas aún más durante las pocas horas del día invernal.

Si observamos en Gráfico 1, en la página siguiente, podremos constatar que la relación entre la duración de día y la radiación solar es directamente proporcional en ambos emplazamientos, siendo representados los valores de Jyväskylä en color naranja y los de París en color verde, pero, a pesar de que en Jyväskylä un día en verano puede superar las 19 horas de duración, esto no se traduce necesariamente en una radiación mayor a la que se tiene para la misma época del año en París, donde el día más largo dura solo 16 horas, aun así radiación solar es mayor en este período, ya que se encuentra más al sur. Definitivamente la latitud tiene un efecto considerable sobre la radiación solar, que hace que más al norte esta disminuya de forma brusca, sobre todo en invierno donde además los días se acortan.

Otro aspecto que resaltar es el que se deriva de cruzar los datos de radiación solar con los datos de temperatura, ya que se observa un desplazamiento en los picos de temperatura con respecto a los de radiación solar en ambos emplazamientos. Como podemos ver en la primera parte del Gráfico 1 dedicado a la radicación solar, el punto más alto de radicación solar se da a principios del verano, pero en la segunda parte del gráfico dedicada a las temperaturas, podemos ver que esa cúspide de las temperaturas más altas se extiende todo el verano. Este fenómeno se podría explicar por el simple hecho de que en esas fechas el hemisferio norte se va calentando, por tanto, la propia inercia térmica del planeta hace que las altas temperaturas cálidas del verano se extiendan más tiempo que los altos niveles de radiación.

Y es que el mismo fenómeno podemos observarlo también a finales del invierno donde, a pesar de empezar a subir los niveles de radiación solar de manera considerable en el mes de febrero, se preservan en ambos emplazamientos las bajas temperaturas.

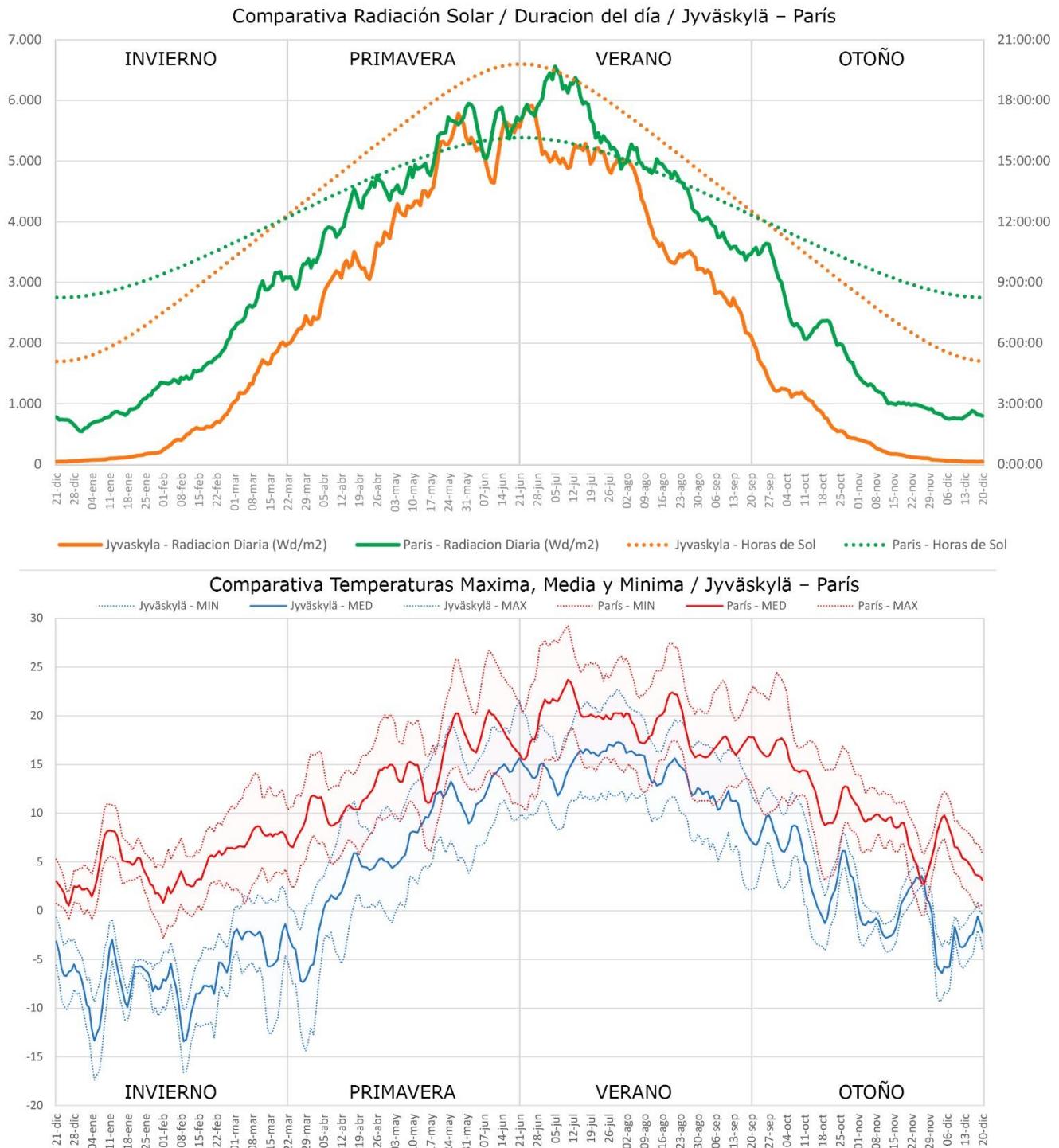


Gráfico 1: Comparativa de radiación Solar, duración del día y temperaturas de Jyväskylä y París por estaciones.
Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

5.3. VIENTOS

Este es quizás uno de los aspectos más interesante de este análisis, ya que el comportamiento del viento varía mucho a lo largo del año, por lo que encontrar patrones claros no fue una tarea fácil. Después de muchos intentos se pudo observar que la mayoría de los vientos, en ambos emplazamientos, no superaban una velocidad de más de 3 metros por segundo. Por lo cual se decidió hacer un filtro en Excel que solo mostrase los vientos más fuertes, por lo cual se tomaron solo el 20% de los vientos más rápidos durante distintos períodos del año, y su dirección correspondiente. De esta forma, se pudieron desarrollar la Tabla 8 y Tabla 9 que pueden ser consultadas en las siguientes páginas.

Gracias a esta metodología se pudieron generar los gráficos que podemos ver a continuación donde podemos observar con claridad como por ejemplo en el caso de Jyväskylä los vientos más frecuentes suelen darse de noche desde el sur este y de día desde el noroeste, mientras que, en París, también se dan de noche mayoritariamente de sur oeste y otras veces del noreste. Poder graficar solo el 20% de los vientos más fuertes resultó ser muy esclarecedor para entender los datos climáticos.

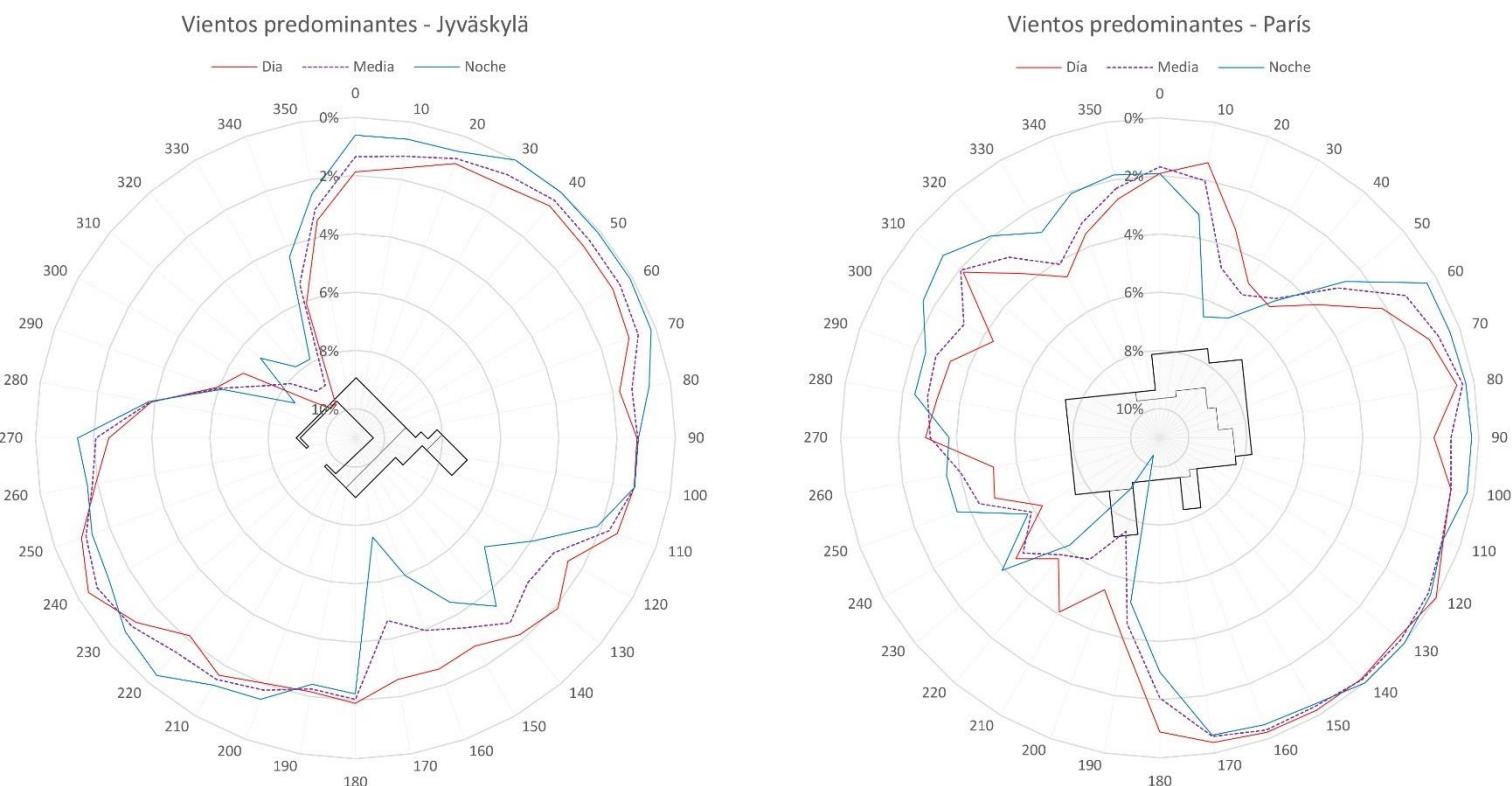


Gráfico 2: Promedio anual de frecuencia de vientos, tomando el 20% de los vientos más rápidos y dividiéndolos en vientos diurnos y nocturnos. Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Vientos predominantes, media anual, diurna y nocturna - Jyväskylä					
Dia		24H / Media		Noche	
12 ms		12 ms		10,8 ms	
4 ms		4 ms		4 ms	
Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia
5,20	1,88%	5,08	1,36%	4,62	0,62%
4,64	1,60%	4,78	1,19%	5,40	0,60%
4,46	0,98%	4,60	0,81%	4,98	0,55%
4,39	0,97%	4,39	0,57%	0,00	0,00%
4,81	0,61%	4,81	0,35%	0,00	0,00%
4,36	0,75%	4,33	0,48%	4,00	0,09%
4,94	0,78%	4,85	0,49%	4,00	0,09%
4,46	0,98%	4,40	0,65%	4,00	0,18%
4,70	1,77%	4,56	1,34%	4,14	0,74%
4,92	1,32%	4,84	1,29%	4,73	1,26%
4,71	1,26%	4,86	1,25%	5,09	1,25%
4,51	1,42%	4,43	1,72%	4,37	2,14%
4,63	2,55%	4,46	3,12%	4,31	3,93%
4,33	1,90%	4,55	3,27%	4,67	5,20%
4,66	2,20%	4,93	2,72%	5,19	3,46%
4,29	2,76%	4,78	3,48%	5,32	4,50%
4,54	2,57%	5,27	3,98%	5,84	5,98%
5,15	2,59%	5,14	4,64%	5,14	7,55%
4,66	1,90%	4,71	2,04%	4,76	2,23%
4,74	2,16%	4,65	2,27%	4,54	2,42%
4,47	2,04%	4,55	1,80%	4,72	1,47%
4,65	1,61%	4,75	1,44%	4,95	1,21%
4,55	2,14%	4,50	1,41%	4,18	0,37%
4,63	1,16%	4,53	0,96%	4,31	0,67%
4,28	0,40%	4,26	0,75%	4,25	1,23%
4,46	0,98%	4,26	1,14%	4,08	1,36%
4,92	1,93%	4,69	1,81%	4,34	1,64%
4,58	2,52%	4,60	2,07%	4,63	1,44%
4,84	3,88%	4,80	3,84%	4,74	3,79%
5,39	5,93%	5,06	6,01%	4,66	6,11%
5,49	6,55%	5,54	7,40%	5,61	8,61%
5,75	9,04%	5,82	8,09%	5,94	6,74%
6,29	9,68%	5,97	8,91%	5,48	7,81%
6,14	9,65%	5,97	8,92%	5,71	7,88%
5,70	6,10%	5,47	5,39%	5,06	4,39%
4,96	3,43%	4,78	3,04%	4,46	2,48%

Vientos predominantes, media anual, diurna y nocturna - París						
Dia		24H / Media		Noche		
16,5 ms		16,5 ms		14,9 ms		
5,7 ms		5,1 ms		4,6 ms		
Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	
0	NORTE	0	7,11	1,92%	6,42	1,92%
10	NORTE	10	7,34	1,40%	6,47	2,04%
20	NORTE	20	6,66	3,37%	6,07	4,79%
30	NORESTE	30	6,55	4,88%	5,98	5,33%
40	NORESTE	40	6,59	5,11%	6,13	4,75%
50	NORESTE	50	7,21	3,89%	6,49	2,99%
60	NORESTE	60	7,09	2,14%	6,68	1,22%
70	ESTE	70	7,05	1,12%	6,28	0,78%
80	ESTE	80	6,37	0,61%	6,12	0,40%
90	ESTE	90	6,50	1,54%	6,30	0,97%
100	ESTE	100	6,39	0,81%	5,82	0,81%
110	ESTE	110	6,37	0,61%	5,96	0,65%
120	SURESTE	120	0,00	0,00%	5,38	0,31%
130	SURESTE	130	6,20	0,29%	5,93	0,17%
140	SURESTE	140	5,70	0,18%	5,40	0,16%
150	SURESTE	150	5,95	0,19%	5,75	0,34%
160	SUR	160	7,20	0,23%	6,16	0,32%
170	SUR	170	7,73	0,37%	6,12	0,58%
180	SUR	180	7,03	0,89%	5,87	2,06%
190	SUR	190	7,69	3,90%	6,51	4,52%
200	SUR	200	7,31	5,44%	7,05	7,58%
210	SUROESTE	210	6,97	4,08%	6,70	6,18%
220	SUROESTE	220	7,03	5,57%	6,45	5,75%
230	SUROESTE	230	6,65	4,53%	6,02	4,84%
240	SUROESTE	240	7,54	6,33%	6,72	5,89%
250	OESTE	250	8,01	4,95%	6,97	4,38%
260	OESTE	260	7,27	5,18%	6,82	4,04%
270	OESTE	270	7,38	2,92%	6,70	3,09%
280	OESTE	280	7,53	3,22%	6,89	2,87%
290	OESTE	290	8,06	3,32%	6,69	2,79%
300	NOROESTE	300	7,09	4,38%	6,55	3,21%
310	NOROESTE	310	6,49	2,16%	5,93	2,04%
320	NOROESTE	320	6,56	3,64%	6,21	2,91%
330	NOROESTE	330	7,11	4,62%	6,33	4,12%
340	NORTE	340	6,58	3,55%	6,06	3,14%
350	NORTE	350	7,03	2,67%	6,17	2,30%

Tabla 8: Dirección de los vientos predominantes, velocidad media anual, diurna y nocturna.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

5.3.1 VIENTOS PREDOMINANTES POR ESTACIONES

Vientos predominantes por estaciones - Jyväskylä.							
Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
12 ms	11 ms	9 ms	9 ms	4 ms	4 ms	3,6 ms	
Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	Frecuencia	Velocidad Promedio (ms)	
4,00	0,12%	4,81	1,55%	4,93	2,88%	6,55	1,28%
5,75	0,66%	4,68	1,50%	4,67	1,95%	4,17	0,61%
5,33	0,46%	4,44	1,00%	4,48	1,68%	0,00	0,00%
0,00	0,00%	4,03	1,03%	5,04	1,05%	4,00	0,20%
0,00	0,00%	4,98	0,80%	4,80	0,40%	3,80	0,37%
4,00	0,23%	4,23	0,82%	4,87	0,61%	4,00	0,20%
0,00	0,00%	4,48	1,15%	5,87	0,73%	0,00	0,00%
4,00	0,58%	0,00	0,00%	4,58	2,10%	0,00	0,00%
4,19	1,33%	4,07	0,92%	5,09	2,97%	0,00	0,00%
4,75	1,78%	4,03	0,39%	5,22	2,61%	4,00	0,20%
5,75	0,66%	5,00	1,93%	4,43	1,29%	4,40	1,08%
4,36	1,38%	4,38	1,55%	4,70	1,96%	4,30	2,10%
4,26	1,96%	4,61	2,37%	4,80	2,00%	4,38	7,28%
5,02	4,92%	4,15	1,47%	4,40	2,39%	4,04	4,14%
5,39	5,44%	4,48	1,15%	4,50	1,13%	3,97	2,52%
5,45	5,34%	4,19	2,02%	4,42	1,66%	4,16	5,49%
6,40	6,65%	4,39	2,26%	4,50	2,44%	4,19	4,10%
5,01	6,35%	4,61	2,67%	5,04	1,05%	5,48	9,10%
4,84	3,21%	4,62	1,48%	4,40	0,55%	4,33	3,17%
4,68	3,24%	4,29	0,96%	5,20	1,52%	4,46	3,48%
4,71	1,76%	4,33	1,53%	4,43	1,29%	4,58	2,91%
4,62	1,46%	4,00	0,26%	4,92	1,85%	4,88	2,62%
4,44	1,79%	4,30	0,55%	4,75	2,38%	4,18	0,82%
4,56	1,18%	4,03	0,52%	4,80	1,80%	3,80	0,37%
4,27	1,48%	4,33	0,42%	4,35	0,36%	3,87	0,57%
4,07	1,88%	4,28	0,55%	4,88	1,22%	3,82	1,12%
4,41	2,80%	4,71	1,06%	5,84	1,95%	3,86	1,51%
4,56	2,63%	4,71	1,36%	4,91	2,25%	4,11	2,21%
4,98	2,59%	4,46	3,30%	5,19	4,98%	4,60	5,17%
4,69	2,70%	5,12	9,20%	5,44	6,81%	4,61	5,86%
5,31	4,44%	5,66	12,73%	5,77	6,98%	4,94	4,58%
6,03	6,43%	5,88	14,54%	5,37	4,48%	5,62	4,67%
6,80	9,01%	6,18	12,89%	5,00	4,59%	4,80	7,51%
6,34	8,96%	6,66	7,28%	5,60	11,21%	5,12	8,26%
5,39	3,58%	5,50	4,95%	5,65	10,61%	4,61	2,93%
4,52	3,00%	4,83	1,86%	4,85	4,25%	4,87	3,57%

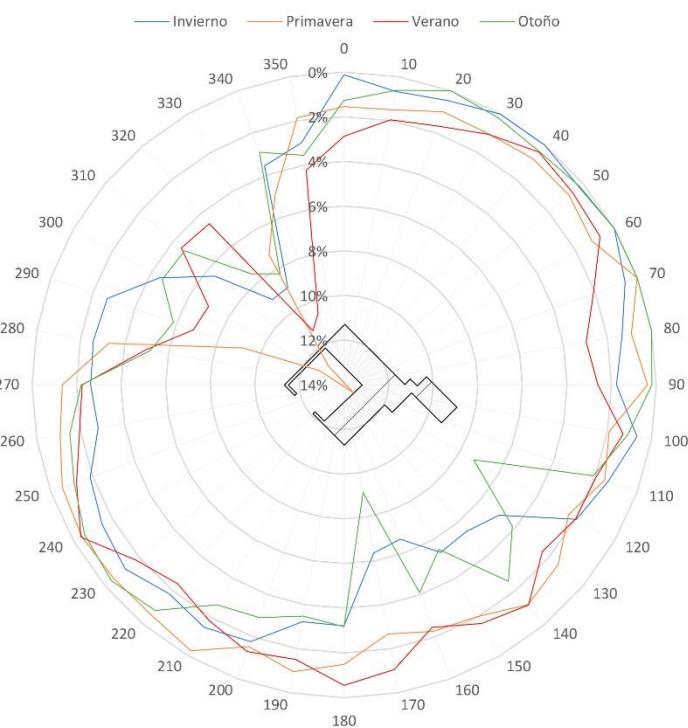
Vientos predominantes por estaciones - París.						
Invierno		Primavera		Verano		Otoño
15,4 ms	11,8 ms	12,9 ms	14,9 ms	5,1 ms	5,1 ms	5,1 ms
VELOCIDAD MÁXIMA	VELOCIDAD MÍNIMA DEL 20% DE VIENTOS MAS VELOCES	VELOCIDAD MÁXIMA	VELOCIDAD MÍNIMA DEL 20% DE VIENTOS MAS VELOCES	VELOCIDAD MÁXIMA	VELOCIDAD MÍNIMA DEL 20% DE VIENTOS MAS VELOCES	VELOCIDAD MÁXIMA
Grados	Grados	Grados	Grados	Grados	Grados	Grados
Origen						
0	NORTE	0	6,00	0,90%	7,17	4,69%
10	NORTE	10	6,39	1,76%	6,24	3,26%
20	NORTE	20	6,40	7,38%	5,62	2,65%
30	NORESTE	30	5,83	5,26%	5,93	4,80%
40	NORESTE	40	5,74	4,17%	6,03	2,99%
50	NORESTE	50	5,69	1,85%	7,11	2,79%
60	NORESTE	60	6,54	1,31%	6,63	1,39%
70	ESTE	70	7,37	0,55%	6,04	1,42%
80	ESTE	80	0,00	0,00%	6,38	0,83%
90	ESTE	90	7,35	1,11%	6,15	1,77%
100	ESTE	100	6,65	0,33%	5,84	2,14%
110	ESTE	110	5,96	1,49%	6,53	0,51%
120	SURESTE	120	6,20	0,16%	5,10	0,67%
130	SURESTE	130	0,00	0,00%	6,45	0,34%
140	SURESTE	140	0,00	0,00%	5,70	0,15%
150	SURESTE	150	5,40	0,41%	0,00	0,00%
160	SUR	160	0,00	0,00%	5,10	0,13%
170	SUR	170	5,54	0,69%	5,65	0,30%
180	SUR	180	6,04	2,42%	5,10	0,93%
190	SUR	190	6,53	3,93%	5,38	1,41%
200	SUR	200	7,02	6,51%	5,75	2,26%
210	SUROESTE	210	7,52	6,59%	5,78	2,42%
220	SUROESTE	220	7,40	5,75%	5,70	3,72%
230	SUROESTE	230	6,57	3,95%	5,77	4,23%
240	SUROESTE	240	6,29	5,83%	6,85	8,24%
250	OESTE	250	6,96	5,06%	6,94	4,90%
260	OESTE	260	6,85	5,32%	7,25	2,08%
270	OESTE	270	7,67	5,00%	6,27	2,30%
280	OESTE	280	8,30	4,78%	6,43	2,19%
290	OESTE	290	7,01	2,81%	7,32	4,02%
300	NOROESTE	300	6,76	2,71%	7,37	4,05%
310	NOROESTE	310	5,81	2,33%	5,83	1,98%
320	NOROESTE	320	6,23	2,96%	5,94	2,95%
330	NOROESTE	330	6,53	2,62%	6,50	8,84%
340	NORTE	340	6,26	1,73%	6,04	7,90%
350	NORTE	350	5,78	2,32%	6,49	4,75%

Tabla 9: Dirección de los vientos predominantes por estaciones climáticas.

Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Utilizando la misma metodología que en el análisis anterior, utilizando una serie de filtros en Excel se dividió la data contenida dentro de los archivos EWP, de cada emplazamiento, por estaciones filtrando además los vientos con velocidades bajas, o lo que es lo mismo, con una velocidad inferior, en su mayoría, a 3 metros por segundo. Por lo cual, quedándonos solo son los vientos que superaban dicha velocidad, que representaban el 20% de la data, y separando dicha data por estaciones, como se puede ver en la Tabla 9, y se consiguió generar los siguientes gráficos:

Vientos predominantes por estaciones Jyväskylä



Vientos predominantes por estaciones París

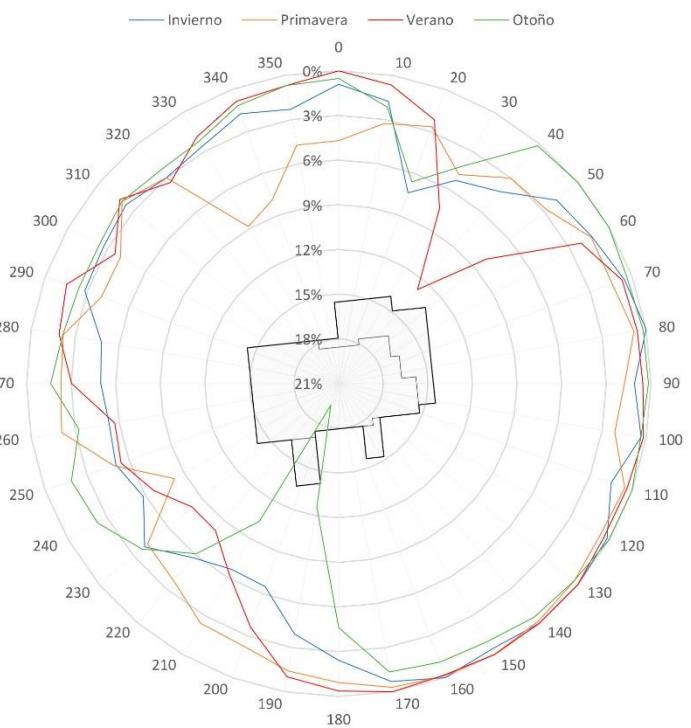
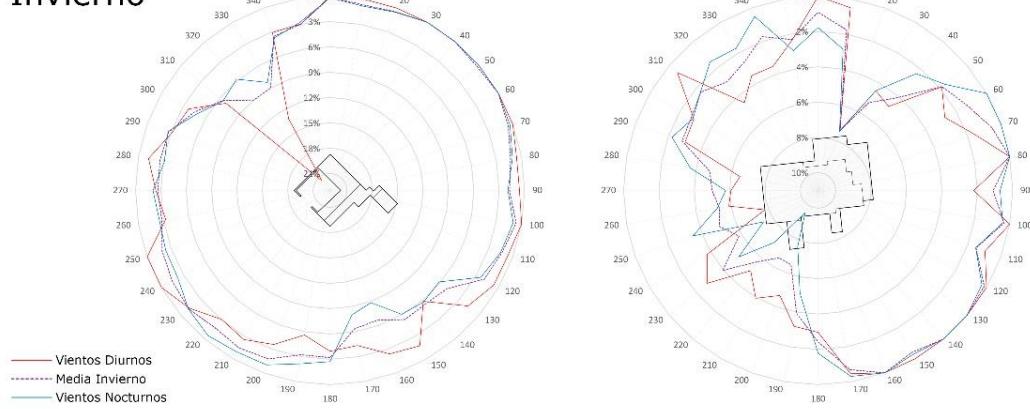


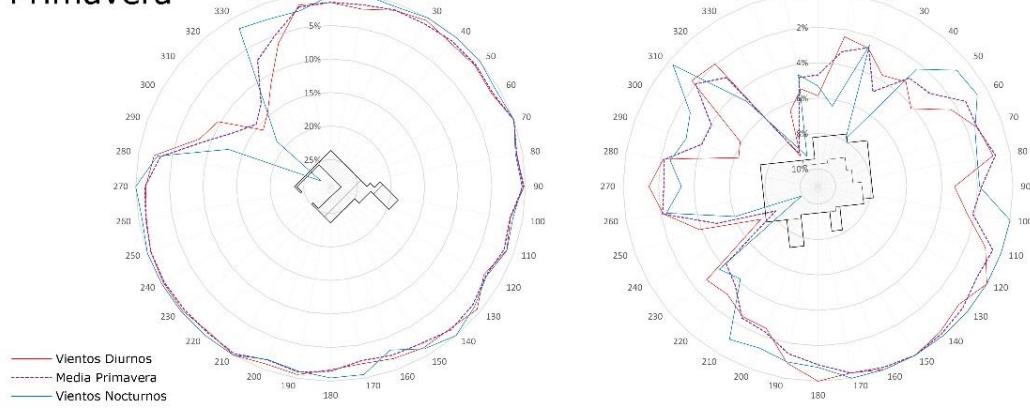
Gráfico 3: Comportamiento de los vientos predominantes por estaciones en Jyväskylä y París
Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

Como podemos observar el Gráfico 3 y Gráfico 4, en Jyväskylä durante la primavera de forma muy frecuente, en más del 14% del tiempo, los vientos predominantes se aproximan desde el noroeste, pero en otoño esta tendencia cambia, ya que se puede apreciar vientos desde el sureste en ángulos de 120 y 170 °. En cambio, en París en otoño los vientos se aproximan claramente desde el suroeste en un ángulo de 200°, pero también en primavera surgen vientos desde el noroeste y en veranos desde el noreste.

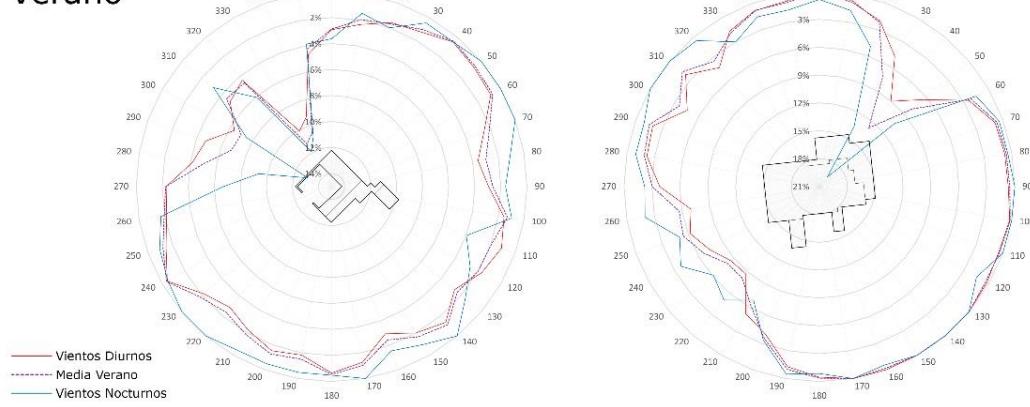
Invierno



Primavera



Verano



Otoño

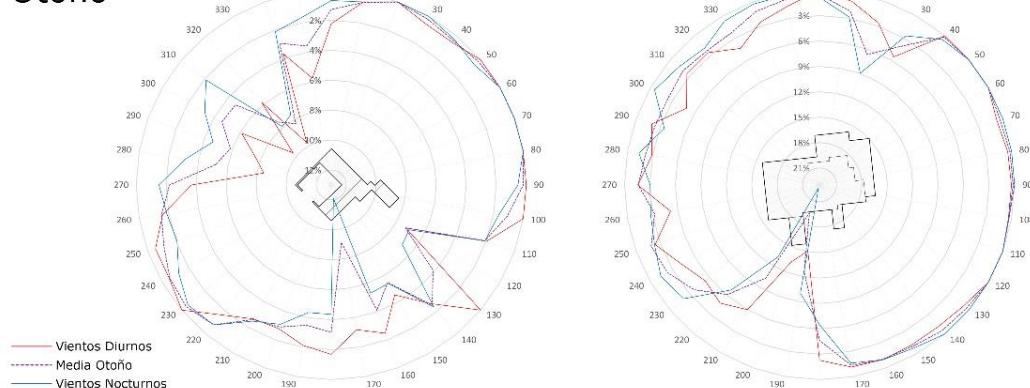


Gráfico 4: Vientos predominantes por estaciones diurnos y nocturnos en Jyväskylä y París
Fuente: Elaboración propia, basados en datos climáticos de (Lawrie, Linda y Drury 2019).

6. APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

Después de haber analizado las condiciones climáticas de cada emplazamiento, se procedió a generar dos modelos 3D de cada vivienda, para intentar certificarlas siguiendo los lineamientos establecidos por el Passivhaus Institut utilizando la herramienta PHPP 9 más DesignPH, un plugin para SketchUp Make 2017, desarrollado por este instituto, que permite exportar de forma rápida y cómoda toda la información métrica del modelo 3D a Excel para ser analizada con la herramienta PHPP 9. (Feist 2015)

6.1. CASA DE VERANO EXPERIMENTAL, EN MUURATSALO, FINLANDIA.

Para conseguir simular el entorno donde está emplazada la edificación, se tomaron como referencia la geometría de la vegetación obtenida desde Google Earth, dicha geometría fue exportada a SketchUp Make, luego, se implantó de forma correcta tomando en cuenta las coordenadas de la edificación como puede verse en la presente imagen:

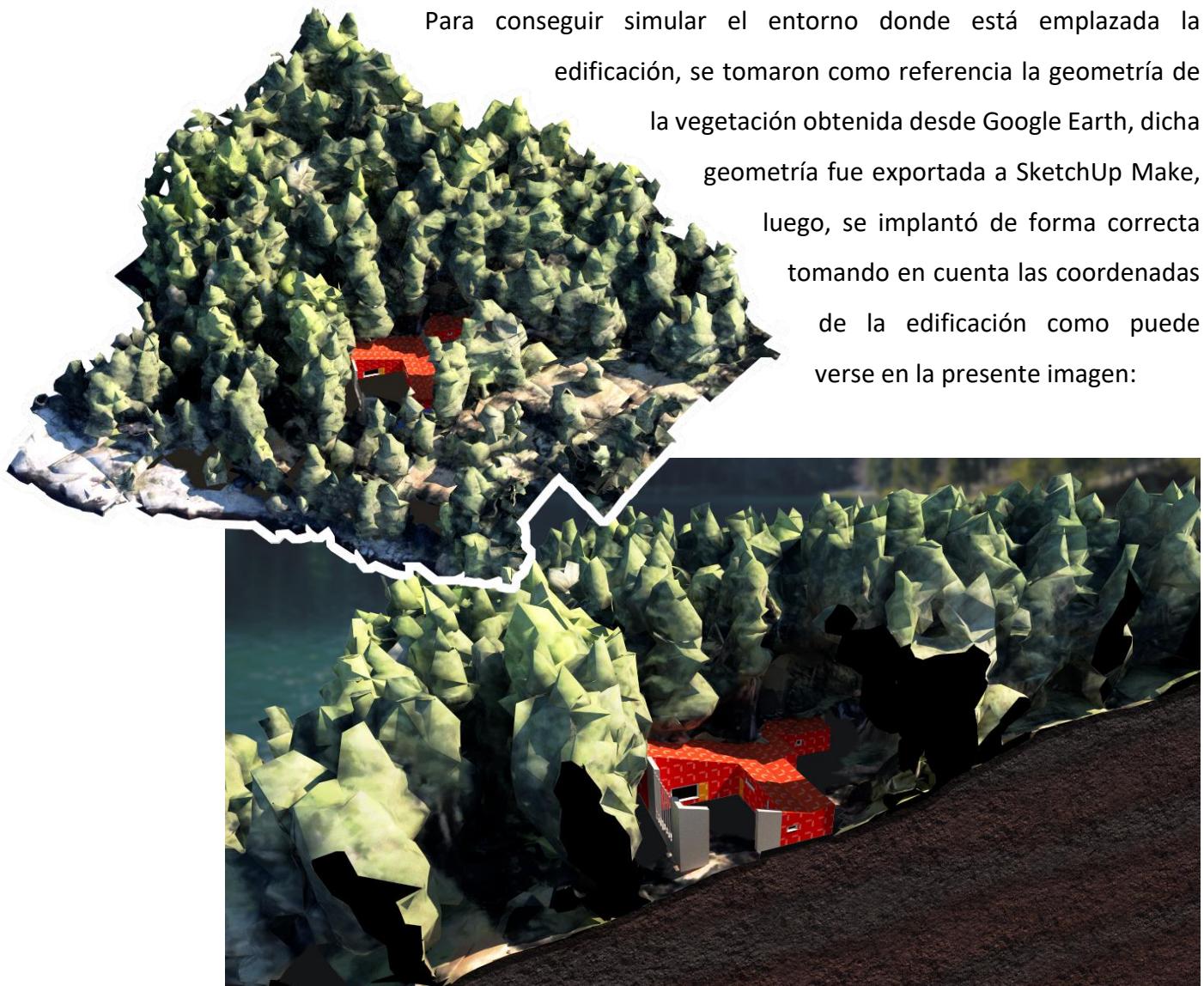


Figura 22 - Representación del entorno vegetal. Fuente: Elaboración propia. Basados en los datos de Google Earth.

A pesar de contar con una geometría muy detallada de la vegetación, dicha geometría ocasionaba un consumo de memoria significativo en el modelo que no permitía manipularlo de forma rápida, por lo cual se tomó la decisión de sustituir los árboles por una semiesfera que representara la sombra que ellos proyectan sobre la casa. Esta representación se calculó tomando el centro de la vivienda como punto de referencia y proyectando líneas hasta la cúspide de los árboles y luego interceptando dichas líneas con la semiesfera, definiendo así el límite real de los obstáculos solares, en este caso los árboles como puede verse en la Figura 23.

Luego de haber resuelto este pequeño problema, se procedió a identificar en el modelo los distintos tipos de superficie que componen toda la estructura de la vivienda. Esto se logra gracias al plugin DesignPH simplemente seleccionando cada superficie y al hacer clic con el botón derecho, permite definir a que grupo pertenece y los Valores-U de cada superficie. Así se diferenciaron la cubierta del techo, los muros exteriores, la losa de piso, las puertas, la huella del edificio y la superficie de referencia energética como se puede ver en la siguiente imagen:

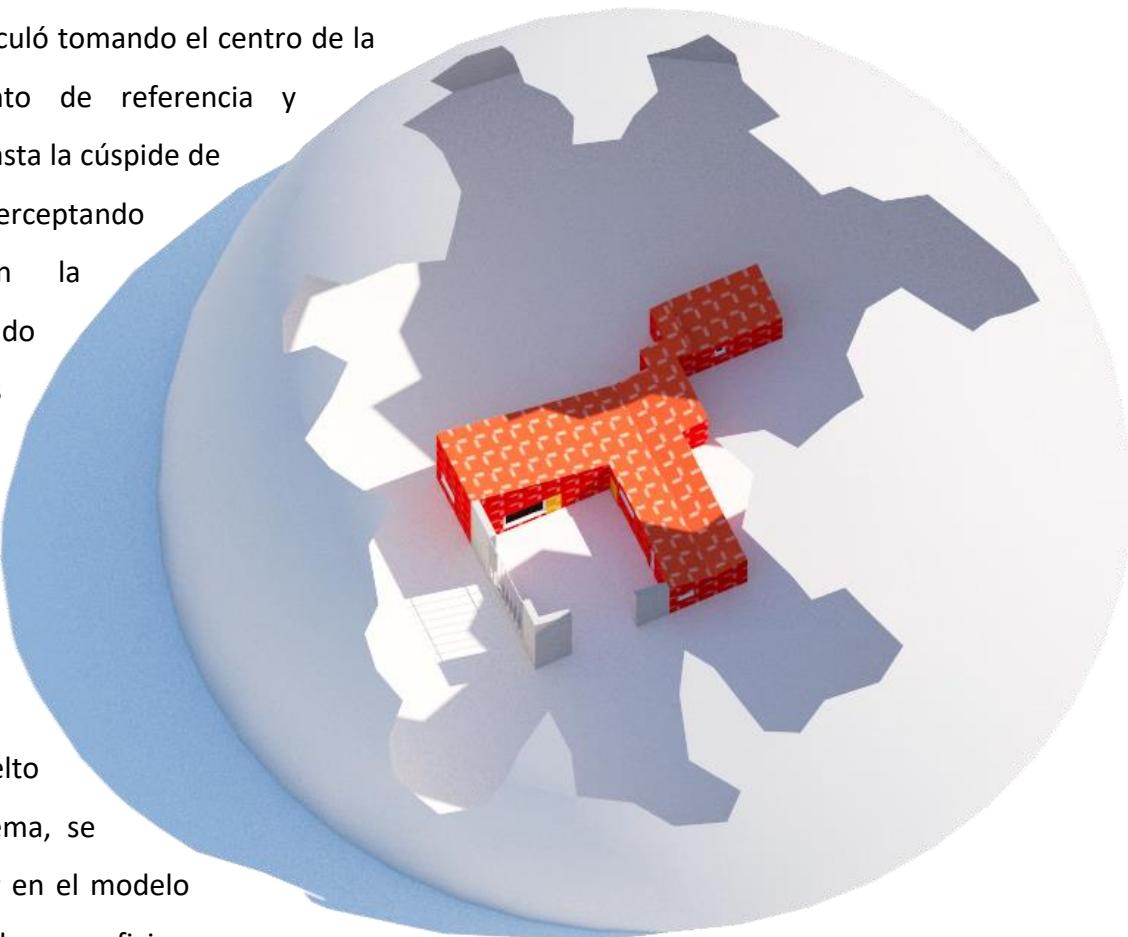


Figura 23 - Semiesfera que representa los obstáculos solares, en este caso los árboles de la zona. Fuente: Elaboración propia. Basado en datos de Google Earth.

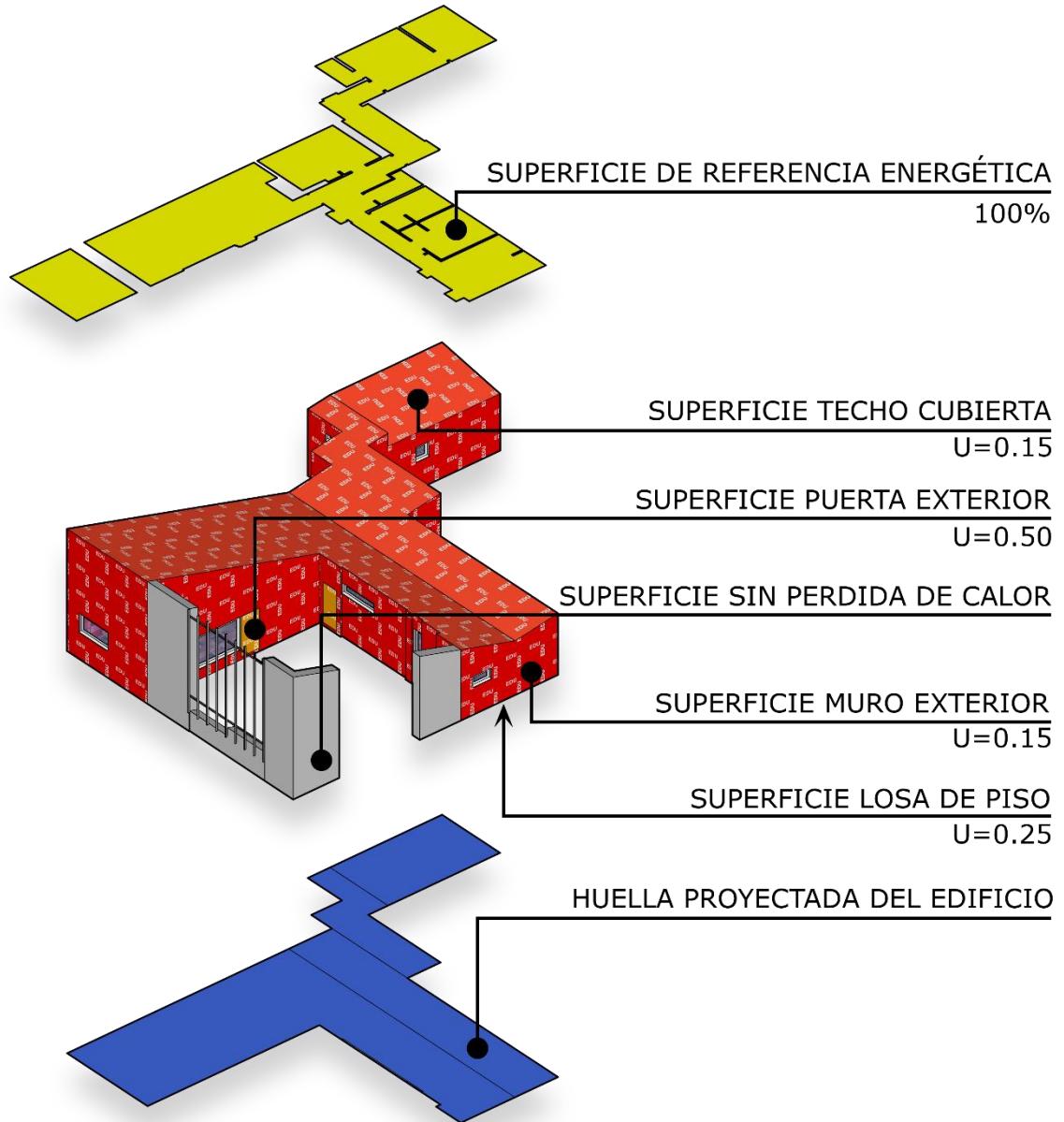


Figura 24 - Distinción de Superficies en modelo 3D. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez definidos el grupo al que pertenece cada superficie, se dibujaron las ventanas en el modelo con la herramienta que el DesignPH dispone para dicho fin y se procedió a realizar el cálculo preliminar, que luego fue exportado a Excel.

6.1.1 PRIMERA INTRODUCCIÓN DE DATOS EN PHPP

Una vez exportados los datos geométricos de las superficies y los volúmenes de la vivienda, gracias al plugin de SketchUp Make 2017, DesignPH, y utilizando la herramienta diseñada también por el Passivhaus Institut, PHPP 9, siglas de Programa de Planificación Passivhaus, programado en su totalidad sobre Microsoft Excel, se empezó a manejar los datos obtenidos dentro de la herramienta PHPP 9. Uno de los primeros pasos fue definir el clima del emplazamiento. Dado que la isla de Muuratsalo no es un emplazamiento cercano a ninguna gran metrópolis, se tuvo que introducir los datos climáticos de forma manual. Dichos datos se obtuvieron de la aplicación web: <http://klimadaten.passiv.de/>, que el Passivhaus Institut dispone para este fin, con dichos datos se pudo alimentar la hoja Clima como se puede ver en la siguiente imagen:

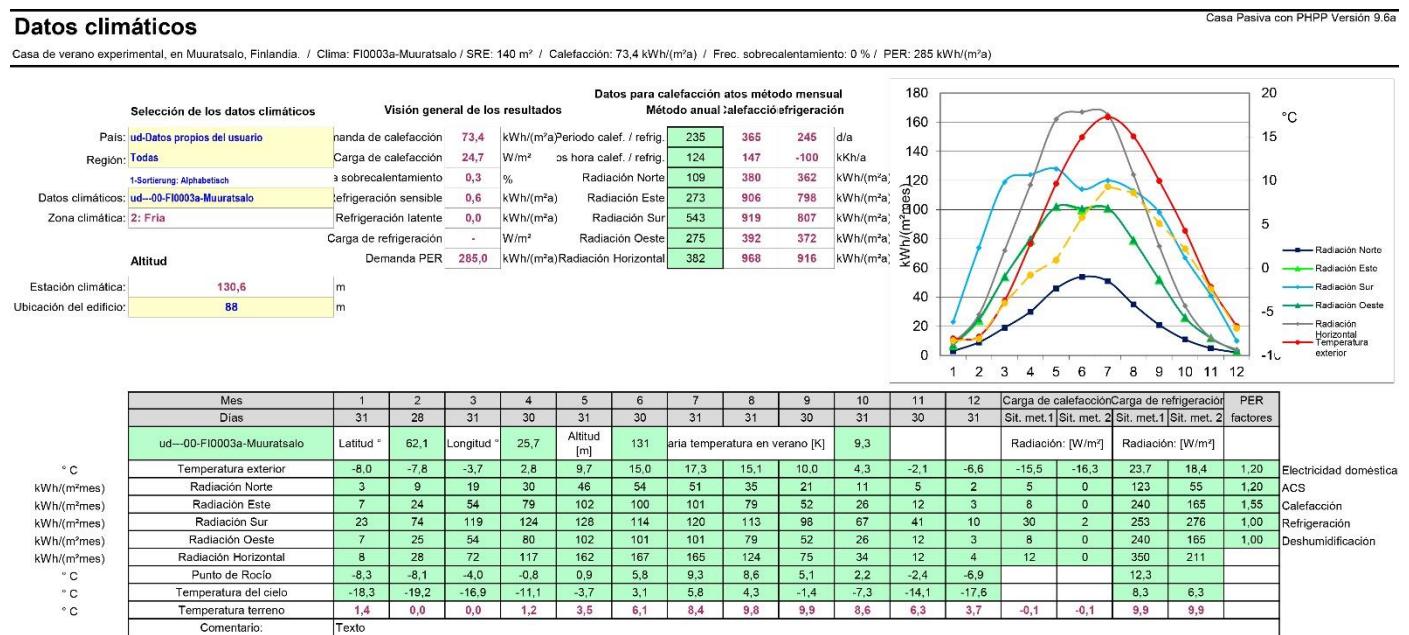


Figura 25 - Hoja Clima de la Herramienta PHPP 9. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Una vez hecha esta modificación, se revisaron en la hoja superficies las propiedades de todos los cerramientos y se añadieron una estimación métrica de los posibles puentes térmicos dentro de la vivienda, como se puede ver en las siguientes imágenes:

Introducción de superficies																
Nr. de área	Denominación elemento constructivo	Grupo n°	Asignación al grupo	Cantidad	x (a [m]	x	b [m]	+	Definido por el usuario [m ²]	-	Restado por el usuario [m ²]	-	Sustracción de las ventanas [m ²]) =	Superficie [m ²]
	Huella proyectada del edificio	0	Huella proyectada del edificio	1	x (		x		+	158,54	-	)	=	158,5
	Superficie de referencia energética	1	SRE (sup. de referencia energética)	1	x (		x		+	139,64	-	)	=	139,6
	Puerta exterior	7	Puerta exterior	1	x (		x		+	-	-)	=	-	
1	EDU_Losa de piso / solera_001_D	11	Solera / losa piso / forjado sanitario	1	x (		x		+	158,48	-	)	=	158,5
2	EDU_Puerta exterior_002_N	7	Puerta exterior	1	x (	2,00	x	0,77	+	-	-	)	=	1,5
3	EDU_Puerta exterior_003_E	7	Puerta exterior	1	x (	2,00	x	0,87	+	-	-	)	=	1,7
4	EDU_Puerta exterior_004_W	7	Puerta exterior	1	x (	2,00	x	0,87	+	-	-	)	=	1,7
5	EDU_Puerta exterior_005_S	7	Puerta exterior	1	x (	2,00	x	1,00	+	-	-	)	=	2,0
6	EDU_Pared_006_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,06	x	1,32	+	-	-	)	=	4,0
7	EDU_Pared_007_E	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	9,63	x	3,06	+	-	-	)	=	26,1
8	EDU_Pared_008_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,32	x	2,19	+	-	-	)	=	7,2
9	EDU_Pared_009_N	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	3,76	-	)	=	3,8
10	EDU_Pared_010_E	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	13,71	-	)	=	10,1
11	EDU_Pared_011_S	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	5,75	-	)	=	5,7
12	EDU_Pared_012_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,44	x	0,66	+	-	-	)	=	1,0
13	EDU_Pared_013_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	4,15	x	3,44	+	-	-	)	=	13,2
14	EDU_Pared_014_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,46	x	1,21	+	-	-	)	=	4,2
15	EDU_Pared_015_N	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	0,29	-	)	=	0,3
16	EDU_Pared_016_S	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	0,29	-	)	=	0,3
17	EDU_Pared_017_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,46	x	0,35	+	-	-	)	=	1,2
18	EDU_Pared_018_N	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	0,29	-	)	=	0,3
19	EDU_Pared_019_S	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	0,29	-	)	=	0,3
20	EDU_Pared_020_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	2,96	-	)	=	3,0
21	EDU_Pared_021_N	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	25,35	-	)	=	24,3
22	EDU_Pared_022_E	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	11,75	-	)	=	10,8
23	EDU_Pared_023_S	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	20,84	-	)	=	20,3
24	EDU_Pared_024_S	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	15,85	-	)	=	15,3
25	EDU_Pared_025_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,53	x	1,58	+	-	-	)	=	5,6
26	EDU_Pared_026_N	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	0,82	-	)	=	0,8
27	EDU_Pared_027_S	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	42,38	-	)	=	37,8
28	EDU_Pared_028_W	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	6,08	x	5,15	+	-	-	)	=	29,6
29	EDU_Pared_029_N	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	59,41	-	)	=	54,0
30	EDU_Techo_030_H	10	Techo / cubierta - Aire ext.	1	x (		x		+	49,70	-	)	=	49,7
31	EDU_Pared_031_E	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (		x		+	1,24	-	)	=	1,2
32	EDU_Techo_032_H	10	Techo / cubierta - Aire ext.	1	x (	6,07	x	3,77	+	-	-	)	=	22,9
33	EDU_Techo_033_H	10	Techo / cubierta - Aire ext.	1	x (		x		+	90,22	-	)	=	90,2

Figura 26 - Enumeración de las superficies exportadas por DesignPH dentro del PHPP 9, en la hoja Superficies. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Introducción de los Puentes Térmicos (PTs)													
Nr.	Denominación del puente térmico	Nr. de grupo	Asignación al grupo	Cantidad	x (	Longitud [m]	-	Sustracción de longitud, determinada por el usuario [m]	) =	Longitud ε [m]	-	Valor psi determinado por el usuario [W/(mK)]) =
1	Losa de Piso - Muros	15	PTs ambiente exterior	1	x (	52,09	-	)	=	52,09		0,072	
2	Muros Exteriores	15	PTs ambiente exterior	3	x (	27,30	-	)	=	81,90		0,044	
3	Puertas	15	PTs ambiente exterior	3	x (	5,00	-	)	=	15,00		0,035	
4	Ventanas	15	PTs ambiente exterior	1	x (	60,60	-	)	=	60,60		0,041	
5	Techos - Muros	15	PTs ambiente exterior	1	x (	57,85	-	)	=	57,85		0,072	
6					x (-)	=				

Figura 27 - Puentes térmicos estimados para la vivienda. Introducidos en la hoja Superficies de la Herramienta PHPP 9. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Una vez definidos estos valores, podemos tener una un resultado general del consumo actual de la vivienda, esto lo veremos en la siguiente página.

6.1.2 RESULTADO INICIAL

Una vez introducidos los datos anteriores, nos percatamos del alto consumo anual de calefacción de la vivienda, llegando a requerir 904 kWh por cada metro cuadrado al año, esto está muy lejos de lo que el Estándar Passivhaus exige, el cual, pone como límite 15 kWh por metro cuadrado al año.

Casa Pasiva Comprobación	
	Edificio: Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Calle: 40950 Muuratsalo Provincia/País: Jyväskylä FI-Finlandia Tipo de edificio: Vivienda Datos climáticos: ud---00-FI0003a-Muuratsalo Zona climática: 2: Fría Altitud de la localización: 88 m
Arquitectura: Alvar Aalto Arquitectura Calle: 63100 Kuortane CP / Ciudad: Ostrobotnia del Sur FI-Finlandia	Propietario / cliente: Alvar Aalto Calle: 63100 Kuortane CP / Ciudad: Ostrobotnia del Sur FI-Finlandia
Consult. energética: Consultora INO Calle: 15000 CP / Ciudad: A Coruña ES-España	Ingeniería: Alvar Aalto Ingenieria Calle: 63100 Kuortane CP / Ciudad: Ostrobotnia del Sur 1-Edificio residencial
Año construcción: 1952 Nr. de viviendas: 1 Nr. de personas: 2,0	Certificación: Passive House Institute Calle: Rheinstr. 44/47 CP / Ciudad: Darmstadt Provincia/País: Ostrobotnia del Sur
	Temp. interior invierno [°C]: 20,0 Temp. interior verano [°C]: 25,0 Ganancias internas de calor (GIC); caso calefacción [W/m ²]: 2,5 GIC caso refrig. [W/m ²]: 2,5 Capacidad específica [Wh/K por m ² del SRE]: 60 Refrigeración mecánica:
Valores específicos del edificio con referencia a la superficie de referencia energética	
Calefacción	Superficie de referencia energética m ² 139,6
	Demanda de calefacción kWh/(m ² a) 904
	Carga de calefacción W/m ² 244
Refrigeración	Demanda refrigeración & deshum. kWh/(m ² a) -
	Carga de refrigeración W/m ² -
	Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C) % 16
	Frecuencia excesivamente alta humedad (> 12 g/kg) % 0
Hermeticidad	Resultado ensayo presión n ₅₀ 1/h 1,0
Energía Primaria no renovable (EP)	Demanda EP kWh/(m ² a) 2425
Energía Primaria Renovable (PER)	Demanda PER kWh/(m ² a) 1432
	Generación de Energía Renovable (en relación con área de la huella del edificio proyectado) kWh/(m ² a) 0
	Criterios
	Criterio alternativos
	≤ 15 -
	≤ - 10
	≤ - -
	≤ 10 -
	≤ 20 -
	≤ 0,6 -
	≤ 120 -
	≤ - -
	≥ - -
	¿Cumplido? ²
	No
	-
	No
	Sí
	No
	No
	-

² Celda vacía: Falta dato; '—': Sin requerimiento

Figura 28 - Hoja de Comprobación del PHPP 9, antes de optimizar el consumo energético de la vivienda. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración propia, utilizando la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Ante estos resultados, se procedió a revisar todos los datos exportados por el DesignPH para encontrar que elementos podrían ser mejorados o corregidos en la vivienda.

6.1.3 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA.

Uno de los primeros elementos de se decidió modificar fue el número de horas de ventilación. Ya que en un clima tan frio como el de Muuratsalo, un exceso de ventilación en vivienda puede disparar el consumo energético dadas las bajas temperaturas del exterior que pueden descender a los -23,70 grados centígrados.

VENTILACIÓN EN VERANO ANTES DE SER OPTIMIZADA

Ventilación en verano		Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a	
Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: Fl0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m ² / Calefacción: 904,1 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 16 % / PER: 1432,2			
Volumen del edificio:	349 m ³	Tipo de edificio:	Vivienda
Humedad absoluta máxima interior:	12 g/kg	Eficiencia en la recuperación de calor:	0%
Fuentes internas de humedad:	100 g/(P ^h)	Eficiencia de recuperación de calor:	0%
		Eficiencia intercambiador de calor tierra-aire:	0%
Resultados refrigeración pasiva		Resultado refrigeración activa	
Frecuencia de sobrecalentamiento:	16,3%	al límite de sobrecal: $\vartheta_{max} = 25^{\circ}C$	Demanda de refrigeración útil: 2,0 kWh/(m ² a)
Humedad máxima:	8,9 g/kg	Demanda de deshumidificación:	0,0 kWh/(m ² a)
Frecuencia de humedad superada:	0,0%	Frecuencia de humedad superada:	0,0%
Ventilación básica en el verano para asegurar la calidad de aire suficiente			
Renov. aire sist. ventilación c/aire impulsión	24,00 1/h		
Valor de referencia ventilación			
	V _v m ³	$\dot{V}_{v,equl,frac}$ 1/h	C _{aire} W/(m ² K)
exterior $H_{v,e}$	349	*	24.000
sin RC	349	*	24.000
Terreno $H_{v,g}$	349	*	0.000
sin RC	349	*	0.000
Infiltración, ventana, sist. extracción	349	*	0,065
			=
			2764,9 W/K
			=
			2764,9 W/K
			=
			0,0 W/K
			=
			0,0 W/K
			=
			7,5 W/K

VENTILACIÓN EN VERANO DESPUES DE SER OPTIMIZADA

Ventilación en verano		Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a	
Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: Fl0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m ² / Calefacción: 73,4 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 0 % / PER: 285 kWh			
Volumen del edificio:	349 m ³	Tipo de edificio:	Vivienda
Humedad absoluta máxima interior:	12 g/kg	Eficiencia en la recuperación de calor:	85%
Fuentes internas de humedad:	100 g/(P ^h)	Eficiencia de recuperación de calor:	0%
		Eficiencia intercambiador de calor tierra-aire:	0%
Resultados refrigeración pasiva		Resultado refrigeración activa	
Frecuencia de sobrecalentamiento:	0,3%	al límite de sobrecal: $\vartheta_{max} = 25^{\circ}C$	Demanda de refrigeración útil: 0,6 kWh/(m ² a)
Humedad máxima:	9,4 g/kg	Demanda de deshumidificación:	0,0 kWh/(m ² a)
Frecuencia de humedad superada:	0,0%	Frecuencia de humedad superada:	0,0%
Ventilación básica en el verano para asegurar la calidad de aire suficiente			
Renov. aire sist. ventilación c/aire impulsión	1,00 1/h		
Valor de referencia ventilación			
	V _v m ³	$\dot{V}_{v,equl,frac}$ 1/h	C _{aire} W/(m ² K)
exterior $H_{v,e}$	349	*	0,154
sin RC	349	*	1,000
Terreno $H_{v,g}$	349	*	0,000
sin RC	349	*	0,000
Infiltración, ventana, sist. extracción	349	*	0,039
			=
			17,7 W/K
			=
			115,2 W/K
			=
			0,0 W/K
			=
			0,0 W/K
			=
			4,5 W/K

Figura 29 - Comparación de horas de ventilación, antes y después de la optimización. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Como podemos ver en la Figura 29, se redujeron las horas de ventilación de 24 horas a solo una 1 hora, esto es solo justificable por las temperaturas tan bajas del exterior y el costo energético que una ventilación más generosa ocasiona por la subida en el consumo por calefacción. También se incorporó un recuperador de calor como se puede ver en la siguiente imagen:

Datos de ventilación			Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a																																														
Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m ² / Calefacción: 73,4 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 0 % / PER: 285 kWh/(m ² a)																																																	
Superficie de referencia energética A _{SRE}	m ²	140	(Hoja de cálculo 'Superficies')																																														
Altura de la habitación h	m	2,50	2,50	(Hoja de cálculo 'Calefacción anual')																																													
Volumen de aire interior ventilación (A _{SRE} ·h) V _v	m ³	349																																															
Tipo de ventilación	1-Vent. equilibrada PH con recuperación calor																																																
Por favor seleccione																																																	
Tasa de renovación de aire por infiltración																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Coeficientes de protección al viento e y f</th> </tr> <tr> <th>Coeficiente e de clase de protección de viento</th> <th>Varios lados expuesto al viento</th> <th>Sólo un lado expuesto al viento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sin protección</td> <td>0,10</td> <td>0,03</td> </tr> <tr> <td>Protección moderada</td> <td>0,07</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td>Protección alta</td> <td>0,04</td> <td>0,01</td> </tr> <tr> <td>Coeficiente f</td> <td>15</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table>						Coeficientes de protección al viento e y f			Coeficiente e de clase de protección de viento	Varios lados expuesto al viento	Sólo un lado expuesto al viento	Sin protección	0,10	0,03	Protección moderada	0,07	0,02	Protección alta	0,04	0,01	Coeficiente f	15	20																										
Coeficientes de protección al viento e y f																																																	
Coeficiente e de clase de protección de viento	Varios lados expuesto al viento	Sólo un lado expuesto al viento																																															
Sin protección	0,10	0,03																																															
Protección moderada	0,07	0,02																																															
Protección alta	0,04	0,01																																															
Coeficiente f	15	20																																															
Coeficiente de protección de viento e	P/ demanda anual	0,04	P/ periodo calefacción:	0,10																																													
Coeficiente de protección de viento f		15		15																																													
Tasa renovación aire ensayo presión n_{50}	1/h	0,60	Volumen de aire neto para el ensayo de presión V_{n50}	567 m ³	Permeabilidad del aire q_{50}																																												
		0,60			0,54 m ³ /(hm ²)																																												
Exceso de aire de extracción	P/ demanda anual	0,00	P/ periodo calefacción:	0,00																																													
Tasa renovación aire por infiltración $n_{V,infiltración}$	1/h	0,039		0,097																																													
Selección de los datos de la ventilación - Resultados																																																	
El PHPP ofrece dos métodos posibles para la Planificación de los caudales de aire y la elección del aparato de ventilación. Con la Planificación estándar se puede calcular las renovaciones de aire para edificios residenciales y un aparato de ventilación como máximo. En la hoja 'Ventilación ad' se pueden considerar hasta 10 aparatos de ventilación. Los caudales de aire se pueden calcular por habitación o por zonas. Favor de seleccionar aquí el método de diseño.																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Aparato de ventilación / Eficiencia de recuperación de calor</th> <th colspan="4">Exceso de aire de extracción</th> <th colspan="2">Valor de eficiencia de RC efectiva</th> <th colspan="2">Recuperación de energía</th> <th colspan="2">Potencia específica W/h/m³</th> <th colspan="2">Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA [-]</th> </tr> <tr> <th>Diseño estándar</th> <th>(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)</th> <th>caudal diseño m³/h</th> <th>Tasa de renovación renovación de aire 1/h</th> <th>Exceso de aire de extracción (sist. extracción de aire) 1/h</th> <th>Ap. de ventilación [-]</th> <th>Valor de eficiencia de RC efectiva [-]</th> <th>Recuperación de energía [-]</th> <th>Potencia específica W/h/m³</th> <th>Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/> Diseño estándar</td> <td>(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)</td> <td>27</td> <td>0,08</td> <td>0,00</td> <td>84,6%</td> <td>0,0%</td> <td>0,39</td> <td>0,0%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Múltiples unidades de ventilación, no-res</td> <td>(Hoja de cálculo 'Vent-Adicional')</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Aparato de ventilación / Eficiencia de recuperación de calor		Exceso de aire de extracción				Valor de eficiencia de RC efectiva		Recuperación de energía		Potencia específica W/h/m ³		Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA [-]		Diseño estándar	(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)	caudal diseño m ³ /h	Tasa de renovación renovación de aire 1/h	Exceso de aire de extracción (sist. extracción de aire) 1/h	Ap. de ventilación [-]	Valor de eficiencia de RC efectiva [-]	Recuperación de energía [-]	Potencia específica W/h/m ³	Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA [-]	<input checked="" type="checkbox"/> Diseño estándar	(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)	27	0,08	0,00	84,6%	0,0%	0,39	0,0%		Múltiples unidades de ventilación, no-res	(Hoja de cálculo 'Vent-Adicional')								
Aparato de ventilación / Eficiencia de recuperación de calor		Exceso de aire de extracción				Valor de eficiencia de RC efectiva		Recuperación de energía		Potencia específica W/h/m ³		Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA [-]																																					
Diseño estándar	(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)	caudal diseño m ³ /h	Tasa de renovación renovación de aire 1/h	Exceso de aire de extracción (sist. extracción de aire) 1/h	Ap. de ventilación [-]	Valor de eficiencia de RC efectiva [-]	Recuperación de energía [-]	Potencia específica W/h/m ³	Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA [-]																																								
<input checked="" type="checkbox"/> Diseño estándar	(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)	27	0,08	0,00	84,6%	0,0%	0,39	0,0%																																									
Múltiples unidades de ventilación, no-res	(Hoja de cálculo 'Vent-Adicional')																																																
						Recuperación refrigeración		Eficiencia recuperación calor ITA n ^o ITA 0 %																																									
Humedad interior media durante el funcionamiento en invierno																																																	
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre																																						
43%	43%	48%	53%	57%	68%	79%	76%	66%	59%	51%	45%																																						

Figura 30 - Hoja ventilación de la Herramienta PHPP 9 después de ser optimizada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

En específico, se propuso la instalación del recuperador de calor "0660vs03-AERA Flex-Shiedel", certificado por el Passivhaus Institut y uno de los más eficientes como podemos ver en la siguiente imagen:

Entrada de datos para la ventilación equilibrada

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a

Dimensionado del sistema de ventilación con un sólo aparato de ventilación

Selección de aparato de ventilación con recuperación de calor

Situación unidad ventilación

1-Dentro de la envolvente térmica

Ir a lista de aparatos de ventilación	Recuperación de calor RC efectiva	Humedad calor eva. RC efectiva	Especifico RC efectiva [Wh/m³]	Uso [m³/h]	Protección contra la congelación
1-Ordenar: COMO LISTA					
Selección aparato ventilación 0660vs03-AERA Flex - Schiedel	0,88	0,00	0,39	54 - 222	si
Conductancia ducto de admisión Ψ	W/(mK)	0,156			
Longitud del ducto de admisión	m	1			
Conductancia del ducto de expulsión Ψ	W/(mK)	0,206			
Longitud del ducto de expulsión	m	1			
Temp. del cuarto de instalaciones	°C				
(Sólo introducir en el caso de que la unidad central está fuera de la envolvente térmica)					
Implementación de la protección contra la congelación	2-Elec.				
Límite de temperatura [°C]	-3				
Energía útil(kWh/a)	130				
Temperatura interior (°C)	20				
Temp. media exterior periodo calefacción	-1,7				
Temp. media terreno (°C)	4,8				

Valor efectivo de recuperación de calor η_{HREf}

84,6%

Eficiencia del Recuperador del intercambiador geotérmico

Eficiencia del intercambiador tierra-aire (ITA)
Eficiencia de recuperación de calor del ITA

η_{ITA}
0%

Cálculo secundario

Valor- Ψ del conducto de aire de impulsión o de admisión

Diámetro interior:	100	mm
Espesor del aislamiento:	150	mm
¿Reflectante?	x	Sí No
Conductividad térmica	0,040	W/(mK)
Caudal de aire nominal	27 m³/h	
$\Delta\theta$	22 K	
Diámetro exterior del tubo	0,100 m	
Diámetro exterior	0,400 m	
α -interior	5,83 W/(m²K)	
α -Superficie	2,21 W/(m²K)	
Valor- Ψ	0,156 W/(mK)	
Diferencia de temp. Superficial	1,217 K	

Cálculo secundario

Valor- Ψ del conducto de aire de expulsión o de extracción

Diámetro interior:	125	mm
Espesor del aislamiento:	100	mm
¿Reflectante?	x	Sí no
Conductividad térmica	0,040	W/(mK)
Caudal de aire nominal	27 m³/h	
$\Delta\theta$	22 K	
Diámetro exterior del tubo	0,125 m	
Diámetro exterior	0,325 m	
α -interior	3,90 W/(m²K)	
α -Superficie	2,44 W/(m²K)	
Valor- Ψ	0,206 W/(mK)	
Diferencia de temp. Superficial	1,790 K	

Figura 31 - Características del recuperador de calor 0660vs03-AERA Flex-Shiedel. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.1.4 SUSTITUCIÓN DE DATOS INTRODUCIDOS EN VENTANAS Y SUPERFICIES

Luego se procedió a mejorar el aislamiento de la vivienda, añadiendo 40 centímetros de aislante térmico en techo, muro exterior y losa de piso, utilizando Lana mineral inyectada, poliéster y vidrio celular. Esto permitió reducir los Valores U de toda la envolvente de forma significativa, como puede verse en la imagen de la próxima página:

Valor-U de los sistemas constructivos

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 0 %

Cálculo secundario: Conductividad térmica equivalente de los espacios de aire en calma -> (a la derecha)

Capas en forma de cuña (aislamiento con pendiente)

Capas de aire sin ventilar y áticos no calefactados

Nr. elem. cons.	Denominación de elemento constructivo			¿Aislamiento interior?		
01ud	Losa de Techo					
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]						
Inclinación del elemento	1-Techo	interior R _{si}	0,10			
Adyacente a	1-Aire exterior	exterior R _{se}	0,04			
Superficie parcial 1	λ [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ [W/(mK)]	Espesos [mm]
Techo de hormigón/concreto	2,100					160
Panel de madera	0,130					50
Lana mineral inyectada	0,040	Viga I	0,374			400
Placa de cartón yeso	0,700					13
Porcentaje superficie parcial 1		Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total
98%		2,0%				62,3 cm
Superficie parcial 1	λ [W/(mK)]					
Lana mineral inyectada	0,040					
		ANTES		Valor-U:	0,106	W/(m ² K)
				Valor-U:	0,592	W/(m ² K)

Nr. elem. cons.		¿Aislamiento interior?					
02ud	Muro Exterior						
Inclinación del elemento		Resistencia térmica superficial [m ² K/W]					
2-Muro		interior R _{si}	0,13				
Adyacente a		exterior R _{se}	0,04				
Superficie parcial 1		λ. [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ. [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ. [W/(mK)]	Espesos [mm]
Aplanado interior		0,350					15
Pared de ladrillo		1,100	Superficie parcial 1	λ. [W/(mK)]			175
Poliestireno		0,040	Poliestireno	0,040			400
Aplanado exterior		0,800					20
Porcentaje superficie parcial 1		Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	
100%						61,0 cm	
Suplemento al valor-U		W/(m ² K)	ANTES		Valor-U: 0,096 W/(m ² K)		
			Valor-U: 2,519 W/(m ² K)				

Nr. elem. cons.		¿Aislamiento interior?							
03ud	Losa de Piso								
Inclinación del elemento		Resistencia térmica superficial [m ² K/W]							
3-Suelo		interior R _{si}	0,17						
Adyacente a	2-Terreno	exterior R _{se}	0,00						
Superficie parcial 1	λ [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ [W/(mK)]				
Parqué	0,130				Espesor [mm]				
Pavimento	1,050	Superficie parcial 1	λ [W/(mK)]		22				
Losa de hormigón/concreto	2,100				48				
Aislamiento térmico horizontal de losa de fundación (vidrio celular)	0,036	Aislamiento térmico horizontal de losa de fundación (vidrio celular)	0,036		160				
					400				
Porcentaje superficie parcial 1		Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3					
100%									
Suplemento al valor-U		W/(m ² K)		ANTES					
		Valor-U: 2,169 W/(m ² K)		Valor-U: 0,086 W/(m ² K)					
Total cm									
63,0									

Figura 32 – Hoja Valores-U. Añadiendo aislante térmico en muros, techo y losa de piso. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Además, se sustituyeron todos los acristalamientos y marcos por componentes certificados por el Passivhaus Institut, como podemos en la Figura 33. En este caso, se decidió utilizar el acristalamiento certificado “0424gl03-Interpane - iplus 3 LS und LST helles float (4/16:/4/16:/4 Ar 90%)” ya que posee una muy buena propiedad aislante y a la vez aumenta significativamente la ganancia de calor por luz solar al permitir pasar los rayos ultravioleta al interior de la vivienda, algo muy beneficioso en tanto en invierno como en verano, ya que en Finlandia aun en verano la radiación solar no llega a generar problemas de sobrecalentamiento. Y además hay que tener en cuenta que la casa está rodeada un denso bosque como se puede observar en las imágenes anteriores, esto agrega un obstáculo adicional que reduce significativamente la radiación solar. Pero, aunque dichos arboles reducen la insolación, muy deseable en esta latitud, generan una protección excelente a los fuertes vientos que se registran en esta zona. Por lo cual, es mayor el beneficio que el perjuicio.

Ventanas

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 0 % / PER: 285 kWh/(m²a)

Orientación de la superficie de la ventana	Radiación global (orientaciones principales)	Sombras	Suciedad	Incidencia de radiación no vertical	Proporción de acristalamiento	Valor g	Factor de reducción para radiación solar	Superficie de ventana	Valor-U de ventana	Superficie de acristalamiento	Radiación global promedio
Valores estándar -->	kWh/(m ² a)	0,75	0,95	0,85	0,67	0,63	0,10	m ²	W/(m ² K)	m ²	kWh/(m ² a)
Norte	109	0,19	0,95	0,85	0,67	0,63	0,10	6,46	0,87	4,31	144
Este	273	0,14	0,95	0,85	0,70	0,63	0,08	7,88	0,85	5,53	448
Sur	543	0,36	0,95	0,85	0,76	0,63	0,22	5,60	0,82	4,24	458
Oeste	275	0,28	0,95	0,85	0,61	0,63	0,14	4,06	0,90	2,48	149
Horizontal	382	1,00	0,95	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	382
Total o valor promedio de todas las ventanas						0,63	0,13	24,00	0,86	16,56	

Grados hora calefacción [kWh/a]:		123,6		Medidas hueco de albañilería		Instalado en		Acrystalamiento		Marco		Valor g	Valor-U		Ψ Borte de vidrio
Cantidad	Descripción	Desviación con respecto al norte	Ángulo de inclinación respecto a la horizontal	Orientación	Anchura	Altura	Selección a partir de hoja 'Superficies'	Selección a partir de hoja 'Componentes'	Selección a partir de hoja 'Componentes'	Radiación perpendicular	Acrystalamiento	Marco (pro-medio)	Ψ Borte de vidrio (Prom.)		
		-	-		m	m									
1	EDU_Vent_001_W	313,9	90	Oeste	0,570	2,210	12-EDU_Pared_012_W	0424gl03-Interpane - iplus 3 LS und LST helles float (4/16:/4/16:/4 Ar 90%)	0640wi02-dPHt, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0,63	0,69	0,55	0,025		
1	EDU_Vent_002_S	223,9	90	Sur	2,856	1,600	27-EDU_Pared_027_S	0424gl03-Interpane - iplus 3 LS und LST helles float (4/16:/4/16:/4 Ar 90%)	0640wi02-dPHt, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0,63	0,69	0,56	0,025		
1	EDU_Vent_003_E	133,9	90	Este	2,009	1,800	18-EDU_Pared_010_E	0424gl03-Interpane - iplus 3 LS und LST helles float (4/16:/4/16:/4 Ar 90%)	0640wi02-dPHt, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0,63	0,69	0,56	0,025		
Acrystalamiento								Marco							
0424gl03-Interpane - iplus 3 LS und LST helles float (4/16:/4/16:/4 Ar 90%)								0640wi02-dPHt, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate							

Figura 33 – Hoja Ventanas. Sustitución de ventanas por acristalamientos y marcos certificados por el Passivhaus Institut. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.1.5 AÑADIENDO ENERGÍA RENOVABLE

Después de realizar los cambios antes expuestos, se procedió a dotar a la vivienda de un sistema funcional de energía renovable que permitirá disminuir su dependencia de la energía primaria no renovable, como se puede observar en la Figura 34 se decidió instalar una bomba de calor y una caldera de biomasa.

ENERGÍA PRIMARIA RENOVABLE ANTES DE SER OPTIMIZADA

Energía Primaria Renovable PER																										
Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m ² /																										
Selección del sistema(s) de generación de calor		Margen de contribución (energía útil)																								
Tipo generador de calor primario		Calefacción	ACS																							
5-Directa eléctrica		100%	100%																							
Generación de calor secundario (opcional y diferente)		0%	0%																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EP</th><th colspan="3">CO₂</th></tr> <tr> <th>Valor específico PER</th><th>Factor EP</th><th>Valor EP</th><th>Factor emisiones CO₂ (CO₂-eq)</th><th>Emisiones CO₂eq</th></tr> <tr> <th>kWh/(m²a)</th><th>kWh/kWh</th><th>kWh/(m²a)</th><th>kg/kWh</th><th>kg/(m²a)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1432,2</td><td>2424,6</td><td>496,1</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					EP		CO ₂			Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq	kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)	1432,2	2424,6	496,1				
EP		CO ₂																								
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq																						
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)																						
1432,2	2424,6	496,1																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EP</th><th colspan="3">CO₂</th></tr> <tr> <th>Valor específico PER</th><th>Factor EP</th><th>Valor EP</th><th>Factor emisiones CO₂ (CO₂-eq)</th><th>Emisiones CO₂eq</th></tr> <tr> <th>kWh/(m²a)</th><th>kWh/kWh</th><th>kWh/(m²a)</th><th>kg/kWh</th><th>kg/(m²a)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1432,2</td><td>2424,6</td><td>496,1</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					EP		CO ₂			Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq	kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)	1432,2	2424,6	496,1				
EP		CO ₂																								
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq																						
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)																						
1432,2	2424,6	496,1																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EP</th><th colspan="3">CO₂</th></tr> <tr> <th>Valor específico PER</th><th>Factor EP</th><th>Valor EP</th><th>Factor emisiones CO₂ (CO₂-eq)</th><th>Emisiones CO₂eq</th></tr> <tr> <th>kWh/(m²a)</th><th>kWh/kWh</th><th>kWh/(m²a)</th><th>kg/kWh</th><th>kg/(m²a)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1432,2</td><td>2424,6</td><td>496,1</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					EP		CO ₂			Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq	kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)	1432,2	2424,6	496,1				
EP		CO ₂																								
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq																						
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)																						
1432,2	2424,6	496,1																								

ENERGÍA PRIMARIA RENOVABLE DESPUÉS DE SER OPTIMIZADA

Energía Primaria Renovable PER																										
Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m ² /																										
Selección del sistema(s) de generación de calor		Margen de contribución (energía útil)																								
Tipo generador de calor primario		Calefacción	ACS																							
2-Bomba(s) de calor		30%	0%																							
Generación de calor secundario (opcional y diferente)		70%	100%																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EP</th><th colspan="3">CO₂</th></tr> <tr> <th>Valor específico PER</th><th>Factor EP</th><th>Valor EP</th><th>Factor emisiones CO₂ (CO₂-eq)</th><th>Emisiones CO₂eq</th></tr> <tr> <th>kWh/(m²a)</th><th>kWh/kWh</th><th>kWh/(m²a)</th><th>kg/kWh</th><th>kg/(m²a)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>285,0</td><td>117,4</td><td>21,8</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					EP		CO ₂			Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq	kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)	285,0	117,4	21,8				
EP		CO ₂																								
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq																						
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)																						
285,0	117,4	21,8																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EP</th><th colspan="3">CO₂</th></tr> <tr> <th>Valor específico PER</th><th>Factor EP</th><th>Valor EP</th><th>Factor emisiones CO₂ (CO₂-eq)</th><th>Emisiones CO₂eq</th></tr> <tr> <th>kWh/(m²a)</th><th>kWh/kWh</th><th>kWh/(m²a)</th><th>kg/kWh</th><th>kg/(m²a)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>285,0</td><td>117,4</td><td>21,8</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					EP		CO ₂			Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq	kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)	285,0	117,4	21,8				
EP		CO ₂																								
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq																						
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)																						
285,0	117,4	21,8																								

Figura 34 - Energía Primaria Renovable (PER) antes y después de ser implementada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Bomba de calor geotérmica (sondas y colectores geotérmicos)

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m²a) / Frec. sobr.

Tipo de edificio: Vivienda	
Superficie referencia energética A _{SRE} :	140 m ²
Sondas geotérmicas	
Configuración del campo de la sonda	A Sonda individual
Profundidad de sonda	H 40 m
Distancia entre sondas	B 1 m
Profundidad (z=H/2)	Z 20 m
Tipo de sonda	A Doble-U
Radio de la perforación	r _b 0,090 m
Radio interno del tubo	r _i 0,013 m
Radio exterior del tubo	r _a 0,016 m
Distancia entre tubos	BU 0,070 m
Radio interno del tubo (coaxial)	r _{i2} 0,050 m
Radio exterior del tubo con recubrimiento	r _{a2} 0,052 m
Conductividad térmica del tubo	λ _R 0,42 W/(mK)
Conductividad térmica de relleno	λ _F 2,00 W/(mK)
Constante de tiempo de la sonda	t _p 2058 d
Resistencia interna de la perforación	R _a 0,169 Km/W
Resistencia de la perforación	R _b 0,066 Km/W
Terreno	
Tipo de terreno	J Otros terreno
Densidad del terreno	ρ _E 2000 kg/m ³
Capacidad térmica del terreno	c _{pE} 1000 J/(kgK)
Conductividad térmica del terreno	λ _E 2,0 W/(mK)
Conductancia de temperatura terreno	a _E 0,000001 m/s ²
Gradiente de temperatura del terreno	ΔT _G 0,022 K/m
Propiedades de la salmuera	
Salmuera (características a 2°C)	E Salmuera
Densidad de la salmuera	ρ _S 1036 kg/m ³
Viscosidad dinámica de la salmuera	η _S 0,0052 kg/(ms)
Capacidad térmica salmuera	c _{pS} 3815 J/(kgK)
Conductividad térmica de salmuera	λ _S 0,4405 W/(mK)
Salmuera - flujo másico	m _S 0,6 kg/s
Colectores geotérmicos	
Radio interno del tubo	r _i 0,013 m
Radio exterior del tubo	r _a 0,016 m
Conductividad térmica del tubo	λ _r 0,420 W/(mK)
Profundidad tubo	z _{pipe} 20 m
Distancia entre tubos	D 0,4 m
Área base	80 m ²
Superficie exterior tubo	20,1 m ²
Longitud tubo	L 200,0 m
Propiedades de la salmuera	
Salmuera (características a 2°C)	A Etilenglicol 25%
Densidad de la salmuera	ρ _S 1052 kg/m ³
Viscosidad dinámica de la salmuera	η _S 0,0052 kg/(ms)
Capacidad térmica salmuera	c _{pS} 3950 J/(kgK)
Conductividad térmica de salmuera	λ _S 0,48 W/(mK)
Salmuera - flujo másico	m _S 0,5 kg/s
U * A	2370 W/K
Clima	
Duración del periodo	T _{m0} 365 d
Temperatura media de la superficie del terreno	T ₁ 4,8 °C
Amplitud de temperatura en la superficie	T ₂ 12,7 °C
Cambio superficial de fases	t ₀₂ 33 d

Figura 35 - Especificaciones Generales del sistema de Bomba de Calor geotérmica. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Como podemos observar en la Figura 35 y Figura 36, se utilizaron valores de referencia extraídos de un archivo de ejemplo proporcionado por el Passivhaus Institut para este fin, ya que no se disponían de estudios de suelos del lugar donde está localizada la vivienda. De esa forma se pudo realizar una estimación del rendimiento de la bomba de calor.

Bomba de calor geotérmica (sondas y colectores geotérmicos)

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m²a) /

Características del terreno	Conductividad	Densidad	Capacidad	Capacidad	Conductividad	Fuente	Resultado cálculo sonda geotérmica
	térmica [W/(mK)]	[kg/m ³]	[J/(kg K)]	[MJ/(m ³ K)]	[10-7 m ² /s]		Perforación Mes Temperatura °C
A Arena, 9% humedad	0,980	1440	1507	2,170	4,520	[Neiß 1977]	1 5,2
B Arena, 13% humedad	1,500	1600	1800	2,880	5,210	[Neiß 1977]	2 5,2
C Terreno, grava	0,520	2000	1840	3,680	1,410	[VDI 1984]	3 5,2
D Suelo arcilloso, 36% humedad	2,300	1650	2847	4,700	4,900	[Neiß 1977]	4 5,2
E Arcilla	1,280	1500	880	1,320	9,700	[VDI 1984]	5 5,2
F Arcilla / limo	2,200	2550	882	2,250	9,780	[VDI 2000]	6 5,2
G Pizarra	2,100	2700	870	2,350	8,940	[VDI 2000]	7 5,2
H Limo	1,500	1920	2938	5,640	2,660	[ISO 13370]	8 5,3
I Roca	3,500	2500	2500	6,250	5,600	[ISO 13370]	9 5,3
J Otros terreno	2,000	2000	1000	2,000			10 5,2
							11 5,2
							12 5,2

Propiedades de la salmuera	Temperatura	Densidad	Capacidad	Conductividad	Viscosidad
	[°C]	[kg/m ³]	[J/(kg K)]	[W/(mK)]	[kg/(ms)]
A Etilenglicol 25%	2	1052	3950	0,480	0,0052
B Carbonato de potasio	2	1265	2941	0,544	0,0031
C Formiato de potasio	2	1226	3190	0,534	0,00237
D Agua	2	997	4190	0,590	0,001307
E Salmuera	2	1036	3815	0,441	0,005

Figura 36 - Propiedades del Terreno y la salmuera utilizados para el cálculo de la bomba de calor geotérmica. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Además, como podemos ver en la Figura 34, se añadió al sistema una caldera para que se encargara de suministrar el 100% del agua caliente sanitaria necesaria para la vivienda y un contribuyera un 70% con la calefacción, ya que la bomba de calor geotérmica no aporta suficiente calor como para hacer frente a la demanda de calefacción de la vivienda. Por lo cual se decidió añadir una caldera alimentada con pellets cuya eficiencia fue estimada en la hoja Caldera cuyo resumen puede visualizarse en la Figura 37.

Caldera (gas, gasóleo y madera)

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 0

Tipo de edificio: Vivienda	
Superficie de referencia energética A _{SRE} :	140 m ²
Proporción de cobertura de la demanda de calefacción (Hoja de cálculo 'PER')	70%
Demanda de calefacción + pérdidas por distribución Q _{Cal} +Q _{tub Cal} ('Distribución+ACS')	10243 kWh
Contribución solar para la demanda de calefacción η _{Solar, Cal} ('Hoja de cálculo 'ACS-Solar')	0%
Demandas efectivas de calefacción Q _{Cal,ef} =Q _{Cal} *(1-η _{Solar, Cal})	7170 kWh
Demandas de calefacción sin pérdidas de distribución Q _{Cal} ('Hoja de cálculo 'Comprobación')	10243 kWh
Proporción de cobertura de demanda de ACS (Hoja de cálculo 'PER')	100%
Demandas totales de calor del sistema de ACS Q _{totACS} ('Distribución+ACS')	2220 kWh
Aportación solar para la generación de ACS η _{Solar, ACS} ('Hoja de cálculo 'ACS-Solar')	0%
Demandas efectivas de ACS Q _{ACS,ef} =Q _{ACS} *(1-η _{Solar, ACS})	2220 kWh
Tipo de generador de calor	31-Combustión de pellets (aporte de calor directo e indirecto)
Combustible	50-Pellets
Factores PER (energía primaria renovable)	(Hoja de cálculo 'Datos')
Factores EP (energía primaria no renovable)	(Hoja de cálculo 'Datos')
Factor de emisiones de CO ₂ (CO ₂ -equivalente)	(Hoja de cálculo 'Datos')
Calor útil aportado Q _{uso}	1,10 kWh _{PER} /kWh _{Final}
Potencia máx. de calefacción para calentar el edificio P _{CalEdif} ('Hoja de cálculo 'Carga-C')	0,20 kWh _{EP} /kWh _{Final}
Duración del periodo de calefacción t _{BC}	0,025 g/kWh
Duración del periodo de ACS t _{AF}	9390 kWh/a
Rendimiento del generador de calor, sistema de calefacción e _{Cal,g,K} =1/(f ₀ * η _{calid})	3,44 kW
Rendimiento del generador de calor, ACS h _{DW,g,K} =h _{100%} /f _{j,DW}	5638 h
Rendimiento anual del generador de calor, calefacción y ACS e _{g,K}	8760 h
Rendimiento del generador de calor, sistema de calefacción	
Rendimiento del generador de calor, ACS	
Rendimiento anual del generador de calor, calefacción y ACS	
Demandas de energía final del generador de calor para calefacción Q _{Final,HE} = Q _{Cal,ef} * e _{Cal,g,K}	206%
Demandas de energía final del generador de calor para ACS Q _{Final,TW} = Q _{ACS,ef} * e _{AF,g,K}	232%
Demandas de energía final del generador de calor total Q _{final} = Q _{End,HE} + Q _{End,TW}	212%
Demandas anuales EP (energía primaria no renovable)	
Emisión anual de CO ₂ equivalente	
	kWh/a
14792	kWh/(m ² a)
5145	142,8
19937	28,6
3987	3,6
498	kg/a
	kg/(m ² a)

Figura 37 - Hoja Caldera, donde se puede observar el rendimiento de la misma. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basada la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.1.6 COMPARANDO RESULTADOS

Una vez realizados todos los ajustes antes mencionados se pudo comprobar una reducción sustancial en la demanda de calefacción de la vivienda. La herramienta PHPP 9 dispone de dos métodos para calcular la calefacción, uno mensual y otro anual. Además, existe una hoja dedicada a calcular las cargas calorías.

Primero se compararán los resultados obtenidos en la hoja de cálculo de la demanda de calefacción utilizando el método anual. Como podemos ver en los siguientes gráficos, hay una reducción muy importante de la demanda de calefacción, sobre todo en los meses de inviernos, llegan a reducirse en casi un 90%.

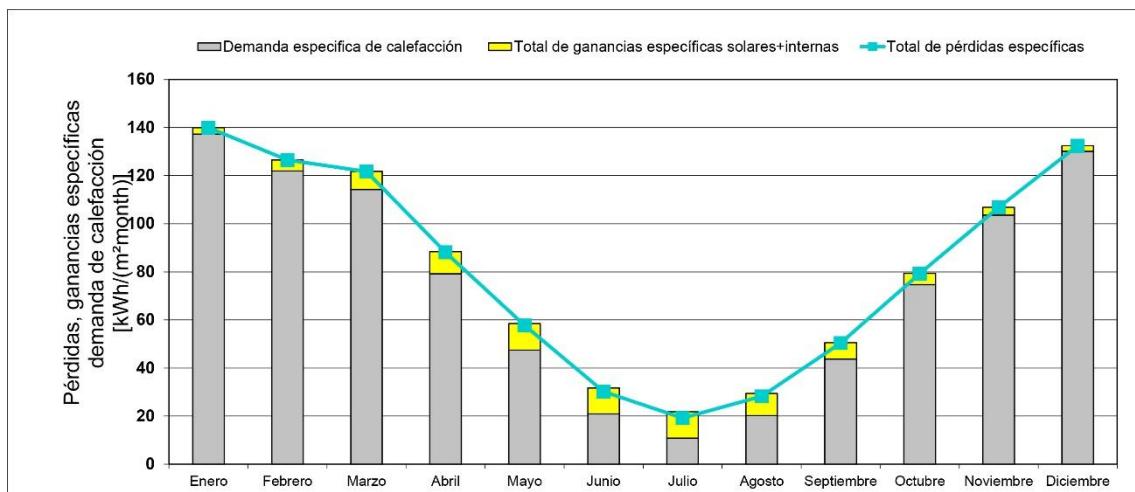


Gráfico 5 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción antes de ser optimizada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

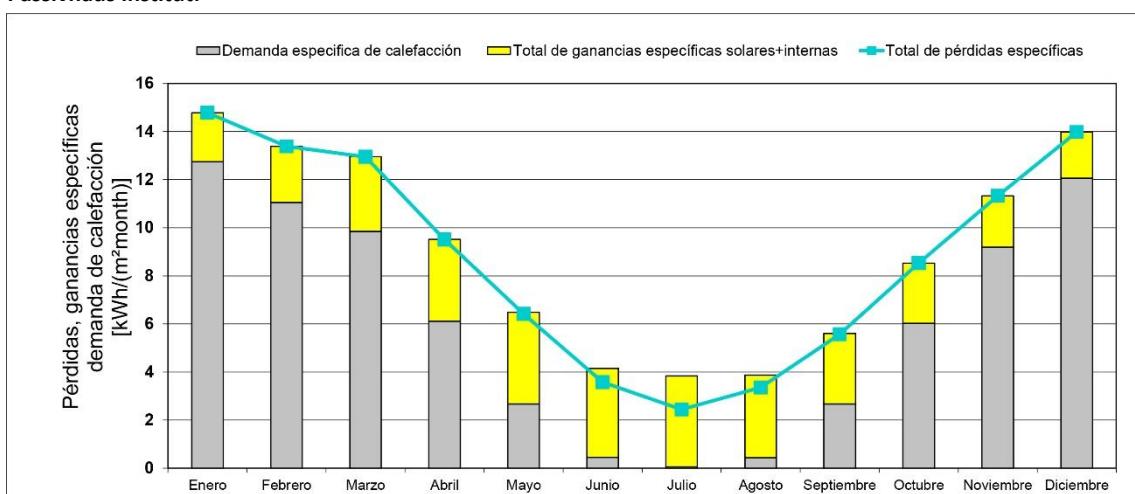


Gráfico 6 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción después de ser optimizada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Los gráficos anteriores se alimentan de los datos de las Tabla 11 y Tabla 13, en ellas podemos observar que demanda específica de calefacción, después de haber mejorada el aislamiento térmico de la vivienda se ha reducido considerablemente, es notorio como en el caso del mes de Julio ya es prácticamente innecesaria, esto es muy positivo ya que justamente esta vivienda, al ser una casa de verano, está habitada justamente durante ese periodo del año. También gracias a las mejoras realizadas, ahora en pleno invierno solo se requieren 12,7 kWh/m², cuando anteriormente la demanda de calefacción era de 137,3 kWh/m², es una reducción superior al 90%.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Año	
Grados-hora de calefacción, ex	21,0	18,9	18,1	12,9	8,3	4,3	2,7	4,3	7,7	12,1	16,3	20,0	147	kKh
Grados-hora de calefacción, ter	4,1	3,9	4,1	3,3	2,5	1,6	1,0	0,8	1,0	1,7	2,5	3,4	30	kKh
Pérdidas hacia el exterior	18141	16325	15596	11182	7199	3671	2329	3672	6682	10492	14060	17300	126648	kWh
Pérdidas hacia el terreno	1402	1335	1392	1130	865	547	348	272	346	582	856	1185	10260	kWh
Total de pérdidas específicas	140,0	126,5	121,7	88,2	57,7	30,2	19,2	28,2	50,3	79,3	106,8	132,4	980,4	kWh/m ²
Ganancias solares - norte	1	3	7	12	18	19	19	13	8	3	1	0	106	kWh
Ganancias solares - este	4	14	25	29	32	29	31	27	21	13	8	2	236	kWh
Ganancias solares - sur	10	32	55	63	69	64	66	59	47	30	17	4	515	kWh
Ganancias solares - oeste	1	2	6	10	15	16	15	11	6	3	1	0	86	kWh
Ganancias solares - horizontal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Ganancias solares - opaco	106	353	691	921	1147	1135	1141	916	643	359	182	49	7642	kWh
Ganancias internas de calor (G)	255	231	255	247	255	247	255	255	247	255	247	255	3007	kWh
Total de ganancias específicas	2,7	4,5	7,4	9,2	11,0	10,8	10,9	9,2	7,0	4,8	3,3	2,2	83,0	kWh/m ²
Grado de aprovechamiento	100%	99%	99%	97%	94%	86%	76%	87%	96%	99%	100%	100%	92%	
Demandas de calefacción	19167	17028	15963	11065	6625	2921	1512	2824	6095	10418	14462	18174	126254	kWh
Demandas específicas de calefacción	137,3	121,9	114,3	79,2	47,4	20,9	10,8	20,2	43,6	74,6	103,6	130,2	904,1	kWh/m ²

Tabla 11 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción antes de ser optimizada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Año	
Grados-hora de calefacción, ex	21,3	19,1	18,2	13,0	8,3	4,1	2,5	4,1	7,7	12,2	16,4	20,3	147	kKh
Grados-hora de calefacción, ter	13,9	13,4	14,9	13,5	12,3	10,0	8,6	7,6	7,3	8,5	9,8	12,1	132	kKh
Pérdidas hacia el exterior	1875	1685	1604	1144	728	364	224	365	678	1075	1447	1786	12974	kWh
Pérdidas hacia el terreno	190	184	204	185	168	137	118	104	100	116	135	166	1807	kWh
Total de pérdidas específicas	14,8	13,4	13,0	9,5	6,4	3,6	2,4	3,4	5,6	8,5	11,3	14,0	105,8	kWh/m ²
Ganancias solares - norte	1	4	11	19	27	29	29	20	12	5	2	1	160	kWh
Ganancias solares - este	6	21	36	42	47	43	45	39	31	20	11	3	345	kWh
Ganancias solares - sur	14	45	77	88	97	89	92	82	66	42	24	6	721	kWh
Ganancias solares - oeste	1	4	9	16	24	26	25	18	10	5	2	1	140	kWh
Ganancias solares - horizontal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Ganancias solares - opaco	6	21	45	63	81	82	82	64	43	23	10	3	524	kWh
Ganancias internas de calor (G)	255	231	255	247	255	247	255	255	247	255	247	255	3007	kWh
Total de ganancias específicas	2,0	2,3	3,1	3,4	3,8	3,7	3,8	3,4	2,9	2,5	2,1	1,9	35,1	kWh/m ²
Grado de aprovechamiento	100%	100%	100%	100%	98%	85%	63%	85%	99%	100%	100%	100%	93%	
Demandas de calefacción	1780	1544	1375	854	374	63	9	61	373	842	1285	1684	10243	kWh
Demandas específicas de calefacción	12,7	11,1	9,8	6,1	2,7	0,5	0,1	0,4	2,7	6,0	9,2	12,1	73,4	kWh/m ²

Tabla 10 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción después de ser optimizada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

RESULTADOS PREVIOS

Demanda de calefacción (método mensual)

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73.4 kWh/(m²a) / Frec. sobrealentamiento: 0 % / PER: 285 kWh/(m²a).

La suma de los períodos de calefacción calculados mediante el método mensual se presentan en esta parte

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a								Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a							
Temperatura interior: 20 °C								Temperatura interior: 20 °C							
Tipo de edificio: Vivienda								Tipo de edificio: Vivienda							
Superficie de referencia energética A _{ref} : 139,6 m ²								Superficie de referencia energética A _{ref} : 139,6 m ²							
Capacidad específica: 60 Wh/(m ² K)								Capacidad específica: 60 Wh/(m ² K)							
Por m ² de SRE								Por m ² de SRE							
G ₁ kWh/a								G ₁ kWh/a							
147 = 103858								147 = 103858							
147 = 14142								147 = 14142							
30 = 10260								30 = 10260							
= 3582								= 3582							
= 757								= 757							
= 2121								= 2121							
= 0,00								= 0,00							
= 0,00								= 0,00							
Total 134520								Total 134520							
963,3 kWh/(m ² a)								963,3 kWh/(m ² a)							
Pérdidas de calor por transmisión QT								Pérdidas de calor por transmisión QT							
Caudal de aire efectivo V _a								Caudal de aire efectivo V _a							
A _{SEG} m ²								A _{SEG} m ²							
140 * 2,50 = 99,7 kWh/(m ² a)								140 * 2,50 = 99,7 kWh/(m ² a)							
Renovación de aire efectiva exterior V _{ext}								Renovación de aire efectiva exterior V _{ext}							
P _{V,ext} t/h								P _{V,ext} t/h							
0,076 *(1 - 0%) * (1 - 0,85) = 0,039 t/h								0,076 *(1 - 0%) * (1 - 0,85) = 0,039 t/h							
Renovación de aire efectiva terreno V _{ter}								Renovación de aire efectiva terreno V _{ter}							
P _{V,ter} t/h								P _{V,ter} t/h							
349 * 0,051 = 17,1 kWh/(m ² a)								349 * 0,051 = 17,1 kWh/(m ² a)							
Pérdidas de ventilación, exterior Q _{V,ext}								Pérdidas de ventilación, exterior Q _{V,ext}							
Pérdidas de ventilación, terreno Q _{V,ter}								Pérdidas de ventilación, terreno Q _{V,ter}							
Total 861								Total 861							
6,2 kWh/(m ² a)								6,2 kWh/(m ² a)							
Pérdidas totales de calor Q _p								Pérdidas totales de calor Q _p							
(13919 + 861) * 1,0 = 14780 kWh/a								(13919 + 861) * 1,0 = 14780 kWh/a							
105,8 kWh/(m ² a)								105,8 kWh/(m ² a)							
Pérdidas de calor ventilación Q _{Vent}								Pérdidas de calor ventilación Q _{Vent}							
Factor de reducción Noche y fin de semana ahorro								Factor de reducción Noche y fin de semana ahorro							
1,0 = 136908 kWh/a								1,0 = 136908 kWh/a							
980,4 kWh/(m ² a)								980,4 kWh/(m ² a)							
Radiación global kWh/a								Radiación global kWh/a							
380 = 106 kWh/a								380 = 106 kWh/a							
906 = 236 kWh/a								906 = 236 kWh/a							
919 = 515 kWh/a								919 = 515 kWh/a							
392 = 86 kWh/a								392 = 86 kWh/a							
968 = 0 kWh/a								968 = 0 kWh/a							
Total 8584 kWh/a								Total 8584 kWh/a							
61,5 kWh/(m ² a)								61,5 kWh/(m ² a)							
A _{SEG} m ²								A _{SEG} m ²							
139,6 = 3007 kWh/a								139,6 = 3007 kWh/a							
21,5 kWh/(m ² a)								21,5 kWh/(m ² a)							
Q ₁ + Q _p = 11591 kWh/a								Q ₁ + Q _p = 11591 kWh/a							
de c Q _{disp} / Q _p = 0,08								de c Q _{disp} / Q _p = 0,08							
= 92% kWh/a								= 92% kWh/a							
η _G * Q _{disp} = 10654 kWh/a								η _G * Q _{disp} = 10654 kWh/a							
Q _p - Q _G = 126254 kWh/a								Q _p - Q _G = 126254 kWh/a							
904 kWh/(m ² a)								904 kWh/(m ² a)							
(S/N)								(S/N)							
¿Requerimiento cumplido?															

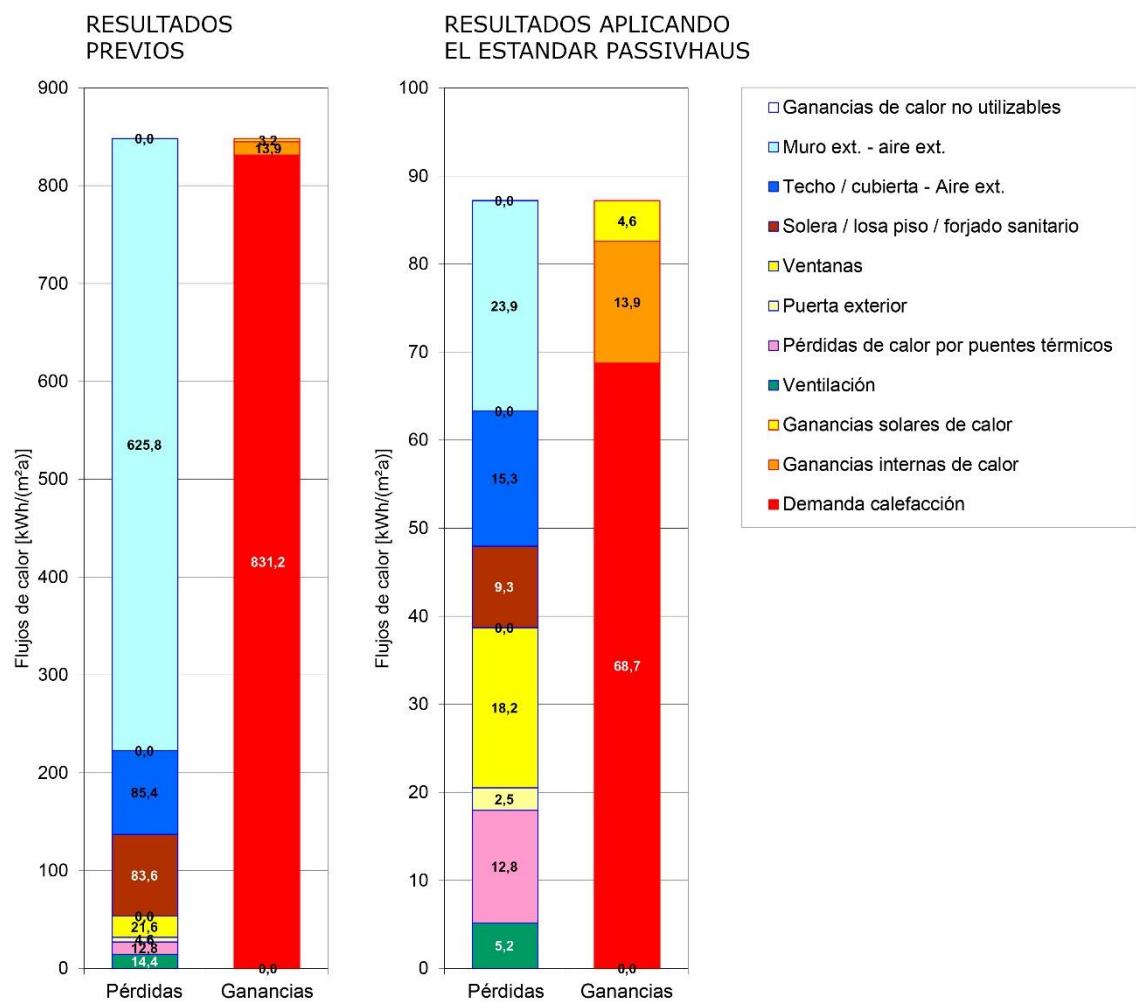


Gráfico 7 - Comparativa de Flujos de Calor, Ganancias y Pérdidas según el método de cálculo anual antes y después de la optimización. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Si consultamos el Gráfico 7 en la hoja de calefacción por método anual, observamos igualmente una reducción considerable de las perdidas en calor y un leve aumento en las ganancias solares, gracias a la utilización de acristalamiento certificado por el Passivhaus Institut. En la figura 39 podemos verificar como, después de aplicar el estándar Passivhaus la demanda de calefacción anual se redujo a 69 kWh/(m²a) de los 831 kWh/(m²a), esto representa una reducción de más de 90% en la demanda de calefacción anual.

RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

RESULTADOS PREVIOS

Demanda de calefacción (método anual)

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 0 % / PER: 285 kWh/(m²a)

Casa Pasiva con PHPP Version 9.6a										Casa Pasiva con PHPP Version 9.6a										
Temperatura interior: 20,0 °C										Temperatura interior: 20,0 °C										
Tipo de edificio: Vivienda										Tipo de edificio: Vivienda										
Superficie de referencia energética A _{SRE} : 139,6 m ²										Superficie de referencia energética A _{SRE} : 139,6 m ²										
Por m ² de SRE										Por m ² de SRE										
Elemento constructivo										Elemento constructivo										
Muro ext. - aire ext.	A	280,6	*	0,096	*	1,00	*	123,6	=	Muro ext. - aire ext.	A	280,6	*	0,096	*	1,00	*	123,6	=	
Muro ext. - terreno	B		*		*	0,76	*		=	Techo / cubierta - Aire ext.	A	162,8	*	0,106	*	1,00	*	123,6	=	
Techo / cubierta - Aire ext.	A	162,8	*	0,106	*	1,00	*	123,6	=	Solera / Iosa piso / forjado sanitario	B	158,5	*	0,086	*	0,76	*	123,6	=	
Solera / Iosa piso / forjado sanitario	A	158,5	*	0,086	*	1,00	*		=		A		*		*					
			*		*	1,00	*		=		A		*		*					
			*		*	0,76	*		=		A		*		*					
			*		*		*		=		X		*		*					
Ventanas	A	24,0	*	0,856	*	1,00	*	123,6	=	Ventanas	A	24,0	*	0,856	*	1,00	*	123,6	=	
Puerta exterior	A	7,0	*	0,408	*	1,00	*	123,6	=	Puertas térmicas exteriores (longitud en m)	A	267,4	*	0,054	*	1,00	*	123,6	=	
Puentes térmicos perímetro (longitud en m)	P		*		*	0,76	*		=	Puentes térmicos piso (longitud en m)	B		*		*	0,76	*		=	
Puentes térmicos piso (longitud en m)	B		*		*		*		=	Total de superficies de la envolvente térmica		632,9								
Total										Total										
Pérdidas de calor por transmisión Q _T										Pérdidas de calor por transmisión Q _T										
A _{SRE} m ² Altura libre habitación m										A _{SRE} m ² Altura libre habitación m										
Sistema de ventilación:										Sistema de ventilación:										
Rendimiento del recuperador de calor de la recuperación de calor										Rendimiento del recuperador de calor de la recuperación de calor										
Eficiencia de recuperación de calor del intercambiador tierra-aire (ITA)										Eficiencia de recuperación de calor del intercambiador tierra-aire (ITA)										
η _{ITa}	85%									η _{ITa}	0%									
Tasa de renovación de aire energéticamente efectiva n _{vent}	0,076	*	(1 - 0,85)	+ 0,039	= 0,051					Tasa de renovación de aire energéticamente efectiva n _{vent}	0,076	*	(1 - 0,85)	+ 0,039	= 0,051					
V _V m ³										V _V m ³										
n _V 1/h										n _V 1/h										
C _{aire} Wh/(m ² K)										C _{aire} Wh/(m ² K)										
G _T kWh/a										G _T kWh/a										
kWh/(m ² a)										kWh/(m ² a)										
Pérdidas de calor por ventilación Q _{Vent}	349,1	*	0,051	*	0,33	*	123,6	=	722	Pérdidas de calor por ventilación Q _{Vent}	349,1	*	0,051	*	0,33	*	123,6	=	722	
Factor de reducción										Factor de reducción										
Q _T kWh/a										Q _T kWh/a										
Q _V kWh/a										Q _V kWh/a										
Noche y fin de semana										Noche y fin de semana										
Ahorro kWh/a										Ahorro kWh/a										
kWh/(m ² a)										kWh/(m ² a)										
Pérdidas totales de calor Q _P	(11453)	+ 722)	1,0	=	12175					Pérdidas totales de calor Q _P	(11453)	+ 722)	1,0	=	12175					
Total										Total										
Ganancias de calor por radiación solar Q _S										Ganancias de calor por radiación solar Q _S										
Orientación de la superficie										Orientación de la superficie										
Factor de reducción										Factor de reducción										
Compare c/ 'Ventanas'										Compare c/ 'Ventanas'										
Radiación perp.										Radiación perp.										
Factor de reducción										Factor de reducción										
Superficie m ²										Superficie m ²										
Radiación global kWh/(m ² a)										Radiación global kWh/(m ² a)										
Pérdidas totales de calor Q _P	(11453)	+ 722)	1,0	=	12175					Pérdidas totales de calor Q _P	(11453)	+ 722)	1,0	=	12175					
Total										Total										
Ganancias internas de calor (GICs) Q _I										Ganancias internas de calor (GICs) Q _I										
Periodo calefacción anual										Periodo calefacción anual										
0,024	*	235	*	2,46	*	139,6	=	1935		0,024	*	235	*	2,46	*	139,6	=	1935		
kWh/d										kWh/d										
día										día										
W/m ²										W/m ²										
m ²										m ²										
A _{SRE} kWh/a										A _{SRE} kWh/a										
kWh/(m ² a)										kWh/(m ² a)										
Ganancias de calor Q _G										Ganancias de calor Q _G										
Q _P - Q _G kWh/a										Q _P - Q _G kWh/a										
Valor máx. permitido 15 kWh/(m ² a)										Valor máx. permitido 15 kWh/(m ² a)										
Requerimiento cumplido? (Sí/No)										Requerimiento cumplido? (Sí/No)										
No										No										
69 kWh/(m ² a)										69 kWh/(m ² a)										
RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS										RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS										
Casa Pasiva con PHPP Version 9.6a										Casa Pasiva con PHPP Version 9.6a										
Temperatura interior: 20,0 °C										Temperatura interior: 20,0 °C										
Tipos de edificio: Vivienda										Tipos de edificio: Vivienda										
A _{SRE} 139,6 m ²										A _{SRE} 139,6 m ²										
Por m ² de SRE										Por m ² de SRE										
Temperatura interior: 20,0 °C										Temperatura interior: 20,0 °C										
Tipos de edificio: Vivienda										Tipos de edificio: Vivienda										
A _{SRE} 139,6 m ²										A _{SRE} 139,6 m ²										
Por m ² de SRE																				

RESULTADOS APLICANDO EL ESTANDAR PASSIVHAUS

RESULTADOS PREVIOS

Carga de calefacción

Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. / Clima: FI0003a-Muuratsalo / SRE: 140 m² / Calefacción: 73,4 kWh/(m² a) / Frec. sobrecalentamiento: 0 % / PER: 285 kWh/(m² a)

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a

Temperatura interior: 20 °C										Interior: 20 °C	
Tipo de edificio: Vivienda										Tipo de edificio: Vivienda	
Superficie de referencia energética A _{Ref} : 139,6 m ²										Superficie de referencia energética A _{Ref} : 139,6 m ²	
Temperatura de cálculo	Radiación:	Norte	Este	Sur	Oeste	Horizontal	W/m ²				
Situación meteorológica 1: -15,5 °C		5	8	30	8	12	W/m ²				
Situación meteorológica 2: -16,3 °C		0	0	2	0	0	W/m ²				
Temperatura del terreno considerada	-0,1 °C										
Elemento constructivo	Zona de temperatura	Superficie m ²	Valor-U W/(m ² K)	Factor Stirling 1 (exponente "X")	Dif. de temperatura 1 K	Dif. de temperatura 2 K	P _{T 1} W	P _{T 2} W	P _{T 1} W	P _{T 2} W	
Muro ext. - aire ext.	A	280,6	* 0,098	1,00	* 35,5 o bien 36,3	=	959	o bien 981	=	25125	o bien 25690
Muro ext. - terreno	B			1,00	* 20,1 o bien 20,1	=			=	3428	o bien 3505
Techo / cubierta - Aire ext.	A	162,8	* 0,106	1,00	* 35,5 o bien 36,3	=	616	o bien 630	=	2559	o bien 2559
Solera / Iosa piso / forjado sanitario	B	159,5	* 0,066	1,00	* 20,1 o bien 20,1	=	275	o bien 275	=		
	A			1,00	* 35,5 o bien 36,3	=			=		
	X			1,00	* 35,5 o bien 36,3	=			=		
Ventanas	A	24,0	* 0,856	0,75	* 35,5 o bien 36,3	=	730	o bien 748	=	868	o bien 888
Puerta exterior	A	7,0	* 0,408	1,00	* 35,5 o bien 36,3	=	102	o bien 104	=	184	o bien 188
Puentes térmicos exteriores (longitud en m)	A	267,4	* 0,054	1,00	* 35,5 o bien 36,3	=	514	o bien 526	=	514	o bien 526
Puentes térmicos perímetro (longitud en m)	P			1,00	* 20,1 o bien 20,1	=			=		
Puentes térmicos piso (longitud en m)	B			1,00	* 20,1 o bien 20,1	=			=		
Muro divisorio entre viviendas	I			1,00	* 3,0 o bien 3,0	=			=		
Carga de calor por transmisión P _T										P _{T 1}	P _{T 2}
										Total	= 3196 o bien 3261
Sistema de ventilación:										3261 W	33355 W
Caudal de aire efectivo V _v m ³										3261 W	33355 W
Eficiencia del recuperador de calor del intercambiador de calor	η _{HC} 85%	eficiencia del ITA	0%		eficiencia del ITA	0%	o bien 0%	o bien 0%	η _{HC} 1 0% o bien 0%	η _{HC} 2 0% o bien 0%	
Tasa de renovación de aire energéticamente efectiva n _{vent}	n _{vent} 0,097	+ 0,076	*(1- 0,85 o bien 0,85)	=	0,109	o bien 0,109	=	0,109	1/h 0,239 o bien 0,239	1/h 0,239 o bien 0,239	
Carga de calor ventilación P _{Vent}										P _{Vent} 1	P _{Vent} 2
V _v m ³										P _{Vent} 1	P _{Vent} 2
	n _v 1/h 0,109 o bien 0,109	n _v 1/h 0,109	*	0,33	Dif. de temperatura 1 K	Dif. de temperatura 2 K	P _{Vent} 1 W	P _{Vent} 2 W	P _{Vent} 1 W	P _{Vent} 2 W	
					35,5 o bien 36,3	=	447	o bien 457	=	978	o bien 1000
Total de cargas de calor P _T										P _T 1	P _T 2
										Total	= 3643 o bien 3719
Orientación de la superficie										P _T 1	P _T 2
Norte	Superficie m ²	Valor g (Radiación perpendicular/Compare hoja "Ventanas")	Factor de reducción	Radiación 1 W/m ²	Radiación 2 W/m ²	P _{T 1}	P _{T 2}	P _{T 1}	P _{T 2}		
Este	6,5	* 0,6	* 0,10	4 o bien 1	=						
Sur	7,9	* 0,6	* 0,08	21 o bien 0	=						
Oeste	5,6	* 0,6	* 0,22	22 o bien 1	=	17 o bien 0	0				
Horizontal	4,1	* 0,6	* 0,14	4 o bien 0	=	1 o bien 0	0				
	0,0	* 0,0	* 0,40	12 o bien 0	=	0 o bien 0	0				
Cargas térmicas solares P _S										Total	= 28 o bien 1
										P _S 1	P _S 2
Carga interna de calor P _I										P _I 1	P _I 2
	Potencia específica W/m ³	A _{Ref} m ²	P _I 1 W	P _I 2 W	P _I 1 W	P _I 2 W	P _I 1 W	P _I 2 W	P _I 1 W	P _I 2 W	
	2,0	*	140	=	273	o bien 273	=	273	=	273	o bien 273
Cargas térmicas (ganancias) P _G										P _G 1	P _G 2
										P _G 1	P _G 2
	P _{Acum} + P _I	=	302	o bien 274	P _G 1	P _G 2	P _G 1	P _G 2	P _G 1	P _G 2	
Carga de calefacción P _{Cal}										P _{Cal} 1	P _{Cal} 2
Carga de calefacción específica PH / A _{TFA}										P _{Cal} 1	P _{Cal} 2
Introducción temp. máx. aire impulsión 52 °C	Temp. máx. aire impulsión 52 °C									P _{Cal} 1	P _{Cal} 2
										= 3341 o bien 3444	= 34081 W
Para comparar: carga máx. de calor trasportable a través del aire impulsión P _{Impuls,Max:}										24,7 W/m ²	244,1 W/m ²
										24,7 W/m ²	244,1 W/m ²
										601 W específico: 4,3 W/m ²	601 W específico: 4,3 W/m ²
¿Calefactable a través del aire de impulsión?										Si(Sí)	Si(Sí)
										No	Si(Sí)
¿Calefactable a través del aire de impulsión?										Si(Sí)	Si(Sí)

Figura 41 - Comparativa Hoja de Carga de Calefacción, antes y después de ser optimizada. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.1.7 RESULTADO FINAL

Luego de mejorar el aislamiento de toda la envolvente, sustituir las ventanas por nuevos acristalamientos y marcos certificados, añadir un intercambiador de calor y una bomba de calor geotérmica, apoyada por una caldera de biomasa, se ha obtenido el siguiente resultado que puede ser verificado en la hoja de comprobación de la herramienta PHPP 9:

Casa Pasiva Comprobación			
	Edificio: Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Calle: CP / Ciudad: 40950 Muuratsalo Provincia/País: Jyväskylä FI-Finlandia		
Arquitectura: Alvar Aalto Arquitectura Calle: CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/País: Ostrobotnia del Sur FI-Finlandia	Tipo de edificio: Vivienda Datos climáticos: ud---00-FI0003a-Muuratsalo Zona climática: 2: Fria Altitud de la localización: 88 m		
Consult. energética: Consultora INO Calle: CP / Ciudad: 15000 A Coruña Provincia/País: ES-España	Propietario / cliente: Alvar Aalto Calle: CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/País: Ostrobotnia del Sur FI-Finlandia		
Año construcción: 1952 Nr. de viviendas: 1 Nr. de personas: 2,0	Ingeniería: Alvar Aalto Ingenieria Calle: CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/País: Ostrobotnia del Sur 1-Edificio residencial		
	Certificación: Passive House Institute Calle: Rheinstr. 44/47 CP / Ciudad: Darmstadt Provincia/País: Ostrobotnia del Sur		
	Temp. interior invierno [°C]: 20,0 Ganancias internas de calor (GIC); caso calefacción [W/m ²]: 2,5 Capacidad específica [Wh/K por m ² de SRE]: 60		
	Temp. interior verano [°C]: 25,0 GIC caso refrig. [W/m ²]: 3,0 Refrigeración mecánica:		
Valores específicos del edificio con referencia a la superficie de referencia energética			
Calefacción	Superficie de referencia energética m ² 139,6 Demanda de calefacción kWh/(m ² a) 73 Carga de calefacción W/m ² 25	≤ Criterio alternativos 15 - 10	¿Cumplido? No
Refrigeración	Demanda refrigeración & deshum. kWh/(m ² a) - Carga de refrigeración W/m ² - Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C) % 0 Frecuencia excesivamente alta humedad (> 12 g/kg) % 0	≤ - - 10 20	- Sí Sí
Hermeticidad	Resultado ensayo presión n ₅₀ 1/h 0,6	≤ 0,6	Sí
Energía Primaria no renovable (EP)	Demanda EP kWh/(m ² a) 117	≤ 120	Sí
Energía Primaria Renovable (PER)	Demanda PER kWh/(m ² a) 285 Generación de Energía Renovable (en relación con área de la huella del edificio proyectado) kWh/(m ² a) 0	≤ - -	-

Figura 42 - Hoja Comprobación con los resultados finales después de haber optimizado el consumo de calefacción y energía primaria no renovable de la edificación. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basada la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Como se puede observar en la Figura 42, la cual muestra la hoja Comprobación de la herramienta PHPP 9 desarrollada por el Passivhaus Institut, se logró reducir la demanda de calefacción a 73 kWh/(m²a), algo notable si tenemos en cuenta que inicialmente su valor ascendía a 904 kWh/(m²a) (ver Figura 38), además, se produjo también una reducción en la Carga de Calefacción que pasó de 244 W/m² a 25 W/m² (ver Figura 40 y Figura 41). A pesar de esta considerable mejora, la vivienda no puede llegar a considerarse pasiva, ya que no cumple el criterio del Passivhaus Institut que especifica que, para ser certificada la vivienda como tal, no deben superar se los 15 kWh/(m²a) en la demanda de Calefacción o los 10 W/m² de Carga de calefacción.

Este resultado, a pesar de no permitirnos certificar la vivienda, es muy positivo si tenemos en cuenta las condiciones climáticas tan adversas que, sobre todo en invierno, se presentan en Muuratsalo, (ver Tabla 2), se ha conseguido reducir la demanda de calefacción en un clima extremadamente frío, a niveles muy eficientes.

Además, gracias a la herramienta de cálculo de balance energético desarrollada por el Passivhaus Institut, se ha logrado dotar a la vivienda de una serie de equipamientos que han permitido reducir su dependencia de la energía primaria no renovable. Y en este aspecto sí que cumple por completo la edificación, ya que gracias a sistemas como la bomba de calor geotérmica y la caldera de biomasa, en conjunción con una mejora del aislamiento térmico de la vivienda, y un recuperador de calor altamente eficiente, se ha logrado reducir la dependencia de energía primaria no renovable a tan solo 117 kWh/m²a, cuando inicialmente llegaba a 2.425 kWh/m²a (ver Figura 28).

Por lo cual, bajo la perspectiva de la sostenibilidad, y teniendo en cuenta el entorno extremo a nivel climático en el cual se encuentra la vivienda, podemos considerar que la implementación del estándar Passivhaus por medio de una reforma de adecuación en esta obra de Alvar Aalto, sería posible, efectiva y muy beneficiosa para el medio ambiente.

6.2. MAISON LOUIS CARRÉ, BAZOCHE SUR GUYONNE, FRANCIA.



Figura 43 - Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.

Ahora, utilizando la misma metodología que en la vivienda anterior, analizaremos la Maison Louis Carré, con el objetivo de determinar si dicha edificación puede cumplir con los límites de demanda energética destinada a calefacción que establece el estándar Passivhaus. La edificación se encuentra completamente rodeada de un denso bosque que aporta una conveniente sombra en verano. por lo cual, se simuló la vegetación circundante por medio de una serie de planos verticales que rodean el modelo 3D.



Figura 44 - Vista Cenital. Maison Louis Carré. Fuente: Google Earth.



Figura 45 – Vista modelo 3D, Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia.

En su interior la vivienda consta de dos niveles, con 3 habitaciones en planta baja y 3 en el primer piso. Dispone de 6 baños de los cuales 4 tienen ducha. También de áreas comunes como cocina, estar y un estudio. En total la vivienda ocupa de 460,9 m² de implantación, y sus dos plantas totalizan 479,59 m² en área útil (descontando las paredes).



Figura 46 - Planos de Planta. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en ver Tabla 18.

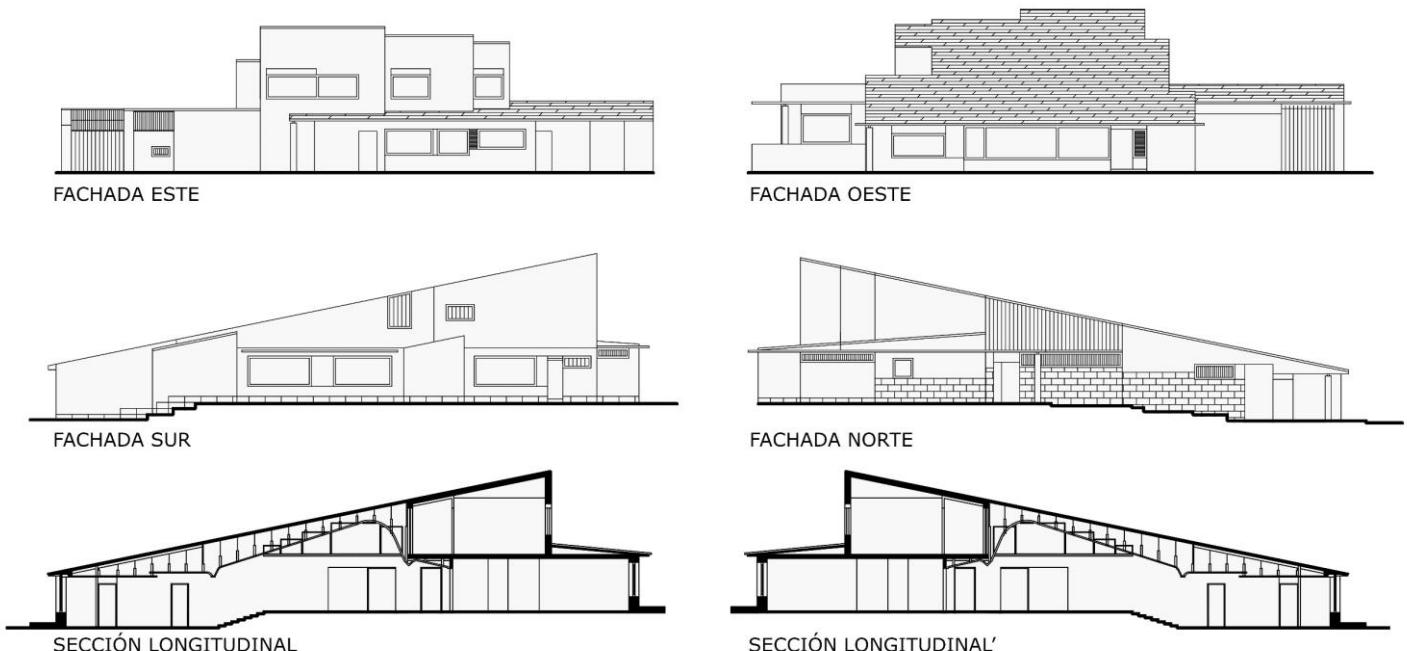


Figura 47 - Fachadas y Secciones. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia, Basado en: ver Tabla 18.

Utilizando la información planimétrica disponible, se catalogó cada superficie de la vivienda dependiendo del tipo de elemento constructivo que representase, distinguiendo paredes, losas, cubiertas, puertas, ventanas, muros en contacto con la tierra y muros en contacto con el exterior. Posteriormente de asignaron los Valores U a cada elemento.

Luego se procedió a realizar el cálculo energético con el plugin DesignPH, el cual arrojó unos resultados que fueron exportados a Excel por medio de un archivo con extensión .ppp .

6.2.1 PRIMERA INTRODUCCIÓN DE DATOS EN PHPP

A diferencia de casa experimental de Muuratsalo, el clima de París si se encontraba por defecto dentro de la base de datos de PHPP 9, por lo que no hubo que realizar ninguna importación de datos externos. Por ende, solo se verificó que los datos climáticos estaban correctamente seleccionados como se puede ver en la siguiente imagen:

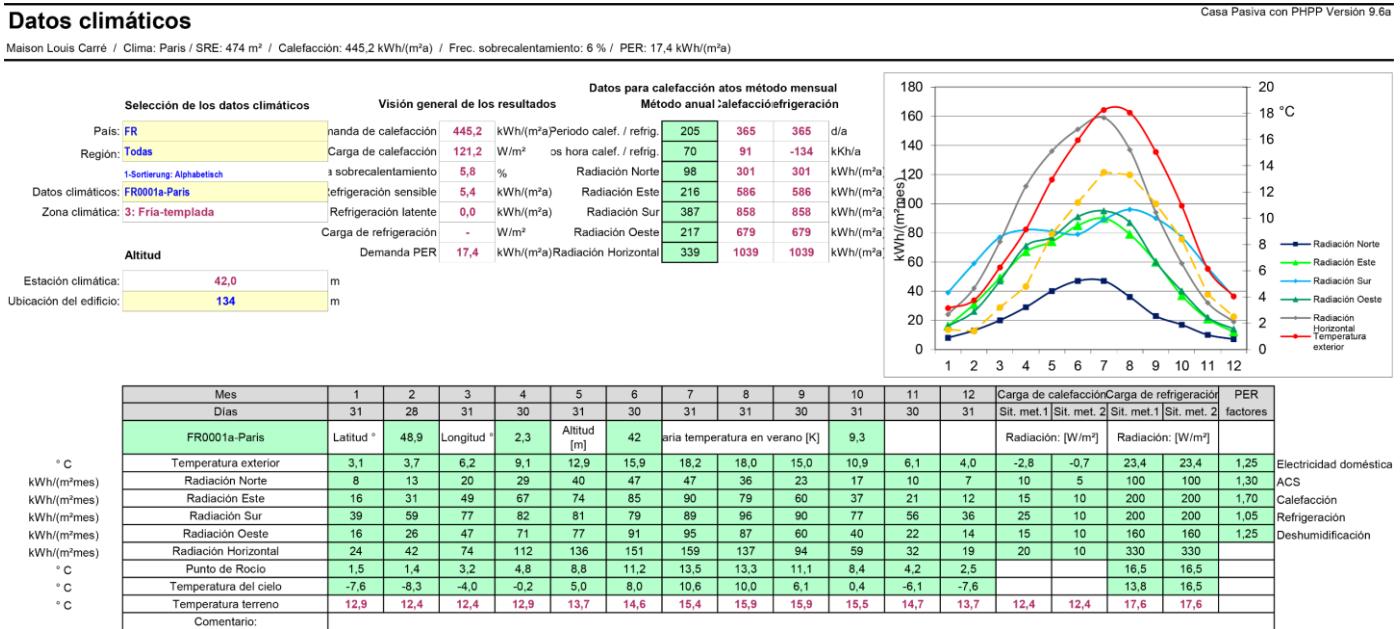


Figura 48 - Hoja Clima de la Herramienta PHPP 9. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Una vez hecha esta verificación, al igual que se hizo con la casa experimental de Muuratsalo, se revisó en la hoja superficies las propiedades de todos los cerramientos y se añadió una estimación métrica de los posibles puentes térmicos dentro de la vivienda, como se puede ver en las siguientes imágenes:

Introducción de superficies															
Nr. de área	Denominación elemento constructivo	Grupo n°	Asignación al grupo	Cantidad	x (a [m]	x	b [m]	Definido por el usuario [m ²]	-	Restado por el usuario [m ²]	-	Sustracción de las ventanas [m ²]) =	Superficie [m ²]
	Huella proyectada del edificio	0	Huella proyectada del edificio	1	x (	x			+ 460,90	-	)	=	460,9
	Superficie de referencia energética	1	SRE (sup. de referencia energética)	1	x (	x			+ 474,21	-	)	=	474,2
	Puerta exterior	7	Puerta exterior		x (	x			+ -	-) -	=	-	
1	I-01-Losa	11	Solera / losa piso / forjado sanitario	1	x (	x			+ 333,23	-	) -	0,0	= 333,2
2	I-02-Losa	11	Solera / losa piso / forjado sanitario	1	x (	x			+ 127,67	-	) -	0,0	= 127,7
3	E-02-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 37,19	-	) -	7,4	= 29,8
4	F-04-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 7,43	-	) -	0,0	= 7,4
5	E-06-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	4,06	x	1,88	+ -	-	) -	0,0	= 7,6
6	E-12-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,60	x	1,50	+ -	-	) -	0,0	= 5,4
7	E-23-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 20,18	-	) -	2,6	= 17,6
8	E-25-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,00	x	1,20	+ -	-	) -	0,0	= 3,6
9	E-28-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	4,38	x	3,84	+ -	-	) -	0,0	= 16,8
10	E-30-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 37,67	-	) -	4,1	= 33,6
11	E-32-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,80	x	3,79	+ -	-	) -	2,1	= 12,4
12	E-34-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	3,55	x	3,36	+ -	-	) -	2,1	= 9,9
13	N-03-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 7,67	-	) -	0,0	= 7,7
14	N-05-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 14,60	-	) -	1,8	= 12,8
15	N-07-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 22,15	-	) -	0,0	= 22,2
16	N-10-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 22,60	-	) -	13,1	= 9,5
17	N-14-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 19,61	-	) -	1,2	= 18,4
18	N-18-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 17,63	-	) -	0,0	= 17,6
19	N-31-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 9,95	-	) -	0,0	= 10,0
20	N-33-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 5,25	-	) -	0,0	= 5,3
21	N-35-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 13,34	-	) -	0,0	= 13,3
22	O-08-Muro	8	Muro ext. - aire ext.	1	x (	x			+ 28,50	-	) -	5,7	= 22,8

Figura 49 - Enumeración de las superficies exportadas por DesignPH dentro del PHPP 9, en la hoja Superficies. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Introducción de los Puentes Térmicos (PTs)												
Nr.	Denominación del puente térmico	Nr. de grupo	Asignación al grupo	Cantidad	x (	Longitud [m]	-	Sustracción de longitud, determinada por el usuario [m]	) =	Longitud ℓ [m]	Valor psi determinado por el usuario [W/(mK)]	Determinado por el usuario $f_{psi=0,25}$ (opcional)
1	Losa de Piso - Muros	15	PTs ambiente exterior	1	x (	159,33	-		) =	159,33	-0,039	0,950
2	Muros Exteriores	15	PTs ambiente exterior	1	x (	139,24	-		) =	139,24	0,000	0,950
3	Puertas	15	PTs ambiente exterior	1	x (	45,19	-		) =	45,19	0,049	0,950
4	Ventanas	15	PTs ambiente exterior	1	x (	199,07	-		) =	199,07	0,028	0,950
5	Muros Exteriores Terreno	15	PTs ambiente exterior	1	x (	10,80	-		) =	10,80	0,000	0,950
6	Techos - Muros	15	PTs ambiente exterior	1	x (	175,04	-		) =	175,04	-0,061	0,950

Figura 50 - Puentes térmicos estimados para la vivienda. Introducidos en la hoja Superficies de la Herramienta PHPP 9. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Una vez definidos estos valores, podemos tener un resultado inicial de la demanda de calefacción anual de la vivienda en la actualidad, esto lo podemos ver en la siguiente página.

6.2.2 RESULTADO INICIAL

Una vez introducidos los datos anteriores, nos percatamos de la alta demanda de calefacción anual de la vivienda, llegando a requerir 461 kWh por cada metro cuadrado al año, esto está muy lejos de lo que el Estándar Passivhaus exige, el cual, pone como límite 15 kWh por metro cuadrado al año.

Casa Pasiva Comprobación					
					
Arquitectura:	Aivar Aalto Arquitectura Calle: Mannerheimintie 30 CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/Pais: Ostrobothnia del Sur FI-Finlandia				
Consult. energética:	Consultora INO Calle: Rúa Alcalde Manuel Casas S/N CP / Ciudad: 15000 A Coruña Provincia/Pais: A Coruña ES-España				
Año construcción:	1959	Temp. interior invierno (°C):	20,0	Temp. interior verano (°C):	25,0
Nr. de viviendas	1	Ganancias internas de calor (GIC); caso calefacción [W/m ²]:	2,2	GIC caso refrig. [W/m ²]:	2,2
Nr. de personas:	3,4	Capacidad específica [Wh/K por m ² de SRE]:	60	Refrigeración mecánica:	
Valores específicos del edificio con referencia a la superficie de referencia energética					
Calefacción	Superficie de referencia energética	m ²	474,2	Criterios alternativos	¿Cumplido? ²
	Demanda de calefacción	kWh/(m ² a)	461		
Refrigeración	Carga de calefacción	W/m ²	125		-
	Demanda refrigeración & deshum.	kWh/(m ² a)	-		
Hermeticidad	Carga de refrigeración	W/m ²	-		-
	Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C)	%	25		
Energía Primaria no renovable (EP)	Frecuencia excesivamente alta humedad (> 12 g/kg)	%	0		-
	Resultado ensayo presión n ₅₀	1/h	0,6		
Energía Primaria Renovable (PER)	Demandas EP	kWh/(m ² a)	1228		-
	Demandas PER	kWh/(m ² a)	794		
Generación de Energía Renovable (en relación con área de la huella del edificio proyectado)		kWh/(m ² a)	0		
<small>² Celda vacía: Falta dato; -: Sin requerimiento</small>					

Figura 51 - Hoja de Comprobación del PHPP 9, antes de optimizar el consumo energético de la vivienda. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración propia, utilizando la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Ante estos resultados, se procedió a revisar todos los datos exportados por el DesignPH para encontrar que elementos podrían ser mejorados o corregidos en la vivienda.

6.2.3 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA.

Uno de los primeros elementos de se decidió modificar fue el número de horas de ventilación. Ya que un exceso de ventilación en vivienda puede disparar la demanda de calefacción. Aunque en este caso el clima no es tan frio como el de Finlandia, al reducir las horas de ventilación mejoró el desempeño energético:

VENTILACIÓN EN VERANO ANTES DE SER OPTIMIZADA

Ventilación en verano				Casa Passiva con PHPV Versión 9.6a	
Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m ² / Calefacción: 460,8 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 25 % / PER: 793,8 kWh/(m ² a)					
Volumen del edificio:	1186	m ³	Tipo de edificio:	Vivienda	
Humedad absoluta máxima interior:	12	g/kg	Eficiencia en la recuperación de calor:	0%	
Fuentes internas de humedad:	100	g(P ^h)	Eficiencia de recuperación de calor:	0%	
			Eficiencia intercambiador de calor tierra-aire:	0%	
Resultados refrigeración pasiva		Resultado refrigeración activa			
Frecuencia de sobrecalentamiento:	25,3%	al límite de sobrecal.: $q_{max} = 25 \text{ °C}$	Demanda de refrigeración útil:	3,8	kWh/(m ² a)
Humedad máxima:	11,8	g/kg	Demanda de deshumidificación:	0,0	kWh/(m ² a)
Frecuencia de humedad superada:	0,1%		Frecuencia de humedad superada:	0,1%	
Ventilación básica en el verano para asegurar la calidad de aire suficiente					
Renov. aire sist. ventilación c/aire impulsión	24,00	1/h			
Renovación de aire efectiva					
exterior $n_{V,ext}$	$n_{V,ext}$	1/h	$n_{V,ext}$	$n_{V,ext}$	1/h
exterior $n_{V,ext}$	24.000		*(1- 0%)	0,00	
sin RC	24.000		*(1- 0%)	0,00	
Terreno $n_{V,ext}$	24.000		*(1- 0%)	0,00	
sin RC	24.000		*(1- 0%)	0,00	
Valor de referencia ventilación					
	V_V	m ³	$n_{V,ext}$	$n_{V,ext}$	W/K
exterior H_V,e	1186		*	24.000	
sin RC	1186		*	24.000	
Terreno H_V,g	1186		*	0.000	
sin RC	1186		*	0.000	
Infiltración, ventana, sist. extracción	1186		*	0.000	

VENTILACIÓN EN VERANO DESPUÉS DE SER OPTIMIZADA

Ventilación en verano

Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m² a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m² a)

Volumen del edificio:	1186	m ³	Tipo de edificio:	Vivienda	
Humedad absoluta máxima interior:	12	g/kg	Eficiencia en la recuperación de calor:	88%	
Fuentes internas de humedad:	100	g/(P'h)	Eficiencia de recuperación de calor:	0%	
			Eficiencia intercambiador de calor tierra-aire:	0%	
Resultados refrigeración pasiva				Resultado refrigeración activa	
Frecuencia de sobrecalentamiento:	6,0%	al límite de sobrecal.: $\eta_{max} = 25^{\circ}C$	Demandas de refrigeración útil:	1,3	kWh/(m ² a)
Humedad máxima:	12,5	g/kg	Demandas de deshumidificación:	0,0	kWh/(m ² a)
Frecuencia de humedad superada:	0,3%		Frecuencia de humedad superada:	0,3%	
Ventilación básica en el verano para asegurar la calidad de aire suficiente					
Renov. aire sist. ventilación claire impulsión	0,30	1/h			
Renovación de aire efectiva					
exterior $n_{V,ext}$	$n_{V,ext}$	$\eta_{V,ext}$	$\eta_{V,ext,fac}$	$n_{V,ext,fac}$	
sin RC	0,300	*(1- *)	0%	0,88	= 0,037
Terreno Hy,g	0,300	*	0%	0,88	= 0,300
sin RC	0,300	*	0%		= 0,000
					= 0,000
Valor de referencia ventilación					
V_V	$n_{V,ext,fac}$	$\eta_{V,ext,fac}$	C_{pre}		
m ³	1/h		W/(m ² K)		
exterior Hy,e	1186	*	0,33	=	14,5 W/K
sin RC	1186	*	0,300	=	117,4 W/K
Terreno Hy,g	1186	*	0,000	=	0,0 W/K
sin RC	1186	*	0,000	=	0,0 W/K
Infiltración, ventana, sist. extracción	1186	*	0,000	=	0,0 W/K

Figura 52 - Comparación de horas de ventilación, antes y después de la optimización. Maison Louis Carré.
Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Datos de ventilación

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a

Maison Louis Carré / Clima: París / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m²a)

Superficie de referencia energética A _{SRE}	m ²	474	(Hoja de cálculo 'Superficies')
Altura de la habitación h	m	2,50	2,50
Volumen de aire interior ventilación (A _{SRE} *h) V _v	m ³	1186	(Hoja de cálculo 'Calefacción anual')

Tipo de ventilación

Por favor seleccione

1-Vent. equilibrada PH con recuperación calor

Tasa de renovación de aire por infiltración

Coeficientes de protección al viento e y f		
Coefficiente e de clase de protección de viento	Varios lados expuesto al viento	Sólo un lado expuesto al viento
Sin protección	0,10	0,03
Protección moderada	0,07	0,02
Protección alta	0,04	0,01
Coefficiente f	15	20
	P/ demanda anual	P/ periodo calefacción:
Coefficiente de protección de viento e	0,07	0,18
Coefficiente de protección de viento f	15	15
Tasa renovación aire ensayo presión n ₅₀	1/h	0,60
	P/ demanda anual	P/ periodo calefacción:
Exceso de aire de extracción	0,00	0,00
Tasa renovación aire por infiltración n _v /infiltración	1/h	0,00
	Volumen de aire neto para el ensayo de presión V _{n50}	Permeabilidad del aire q ₅₀
		0,00 m ³ /hm ²

Selección de los datos de la ventilación - Resultados

El PHPP ofrece dos métodos posibles para la Planificación de los caudales de aire y la elección del aparato de ventilación. Con la Planificación estándar se puede calcular las renovaciones de aire para edificios residenciales y un aparato de ventilación como máximo. En la hoja 'Ventilación ad' se pueden considerar hasta 10 aparatos de ventilación. Los caudales de aire se pueden calcular por habitación o por zonas. Favor de seleccionar aquí el método de diseño.

Aparato de ventilación / Eficiencia de recuperación de calor		caudal diseño	Tasa de renovación renovación de aire	Exceso de aire de extracción (sist. extracción de aire)	Valor de eficiencia de RC efectiva Ap. de ventilación	Recuperación de energía	Potencia específica Wh/m ³	Valor de eficiencia de RC efectiva del ITA
<input checked="" type="checkbox"/> Diseño estándar	(Hoja de cálculo 'Ventilación', ver abajo)	356	0,30	0,00	87,6%	0,0%	0,39	0,0%
Múltiples unidades de ventilación, no-res	(Hoja de cálculo 'Vent-Adicional')					Recuperación refrigeración		Eficiencia recuperación calor ITA η ^{IT} 0%

Humedad interior media durante el funcionamiento en invierno

Enero	Febrero	Marzo	Abri	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
34%	34%	38%	42%	53%	62%	-	-	61%	52%	40%	36%

Figura 53 - Hoja ventilación de la Herramienta PHPP 9 después de ser optimizada. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

También se incorporó un recuperador de calor como se puede ver en la Figura 53. En específico, se propuso la instalación del recuperador de calor "0660vs03-AERA Flex-Shiedel", certificado por el Passivhaus Institut y uno de los más eficientes como podemos ver en la Figura 54. Se trata del mismo modelo que se utilizó en la casa experimental de Muuratsalo, se decidió utilizar el mismo para poder hacer una comparativa real entre las dos viviendas.

Entrada de datos para la ventilación equilibrada							Casa Pasiva con P
Dimensionado del sistema de ventilación con un sólo aparato de ventilación							
Selección de aparato de ventilación con recuperación de calor							
Situación unidad ventilación	1-Dentro de la envolvente térmica						
Selección aparato ventilación	Ir a lista de aparatos de ventilación 1-Ordenar: COMO LISTA 0660vs03-AERA Flex - Schiedel	Recuperación de calor RC efectiva 0,88	Humedad calor efva. RC efectiva 0,00	Específico RC efectiva [Wh/m ³] 0,39	Uso [m ³ /h] 54 - 222	Protección contra la congelación sí	
Conductancia ducto de admisión	Ψ	W/(mK)	0,167	Implementación de la protección contra la congelación	2-Elec.		
Longitud del ducto de admisión	m		1,1	Límite de temperatura (°C)	-3		
Conductancia del ducto de expulsión	Ψ	W/(mK)	0,232	Energía útil(kWh/a)	55		
Longitud del ducto de expulsión	m		1,5	Temperatura interior (°C)	20		
Temp. del cuarto de instalaciones	°C		11	Temp. media exterior periodo calefactorio (°C)	6,5		
(Sólo introducir en el caso de que la unidad central está fuera de la envolvente térmica)				Temp. media terreno (°C)	11,3		
Valor efectivo de recuperación de calor	η _{HR,ef}	87,6%					
Eficiencia del Recuperador del intercambiador geotérmico							
Eficiencia del intercambiador tierra-aire (ITA)	η _{ITA}						
Eficiencia de recuperación de calor del ITA	η _{ITA}	0%					
Cálculo secundario Valor-Ψ del conducto de aire de impulsión o de admisión							
Diámetro interior:	100	mm	Espesor del aislamiento:	150	mm		
¿Reflectante?	x	Si					
Conductividad térmica	0,040	W/(mK)	Caudal de aire nominal	356	m ³ /h		
Δθ	13 K		Diámetro exterior del tubo	0,100 m			
Diámetro exterior	0,400 m		Diámetro exterior	0,400 m			
α-Interior	46,29 W/(m ² K)		α-Interior	30,98 W/(m ² K)			
α-Superficie	2,03 W/(m ² K)		α-Superficie	2,27 W/(m ² K)			
Valor-Ψ	0,167	W/(mK)	Valor-Ψ	0,232	W/(mK)		
Diferencia de temp. Superficial	0,884	K	Diferencia de temp. Superficial	1,349	K		
Cálculo secundario Valor-Ψ del conducto de aire de expulsión o de extracción							
Diámetro interior:	125	mm	Espesor del aislamiento:	100	mm		
¿Reflectante?	x	Si					
Conductividad térmica	0,040	W/(mK)	Caudal de aire nominal	356	m ³ /h		
Δθ	13 K		Diámetro exterior del tubo	0,125 m			
Diámetro exterior	0,325 m		Diámetro exterior	0,325 m			
α-Interior	30,98 W/(m ² K)		α-Interior	30,98 W/(m ² K)			
α-Superficie	2,27 W/(m ² K)		α-Superficie	2,27 W/(m ² K)			
Valor-Ψ	0,232	W/(mK)	Valor-Ψ	0,232	W/(mK)		
Diferencia de temp. Superficial	1,349	K	Diferencia de temp. Superficial	1,349	K		

Figura 54 - Características del recuperador de calor 0660vs03-AERA Flex-Shiedel. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.2.4 SUSTITUCIÓN DE DATOS INTRODUCIDOS EN VENTANAS Y SUPERFICIES

Luego se procedió a mejorar el aislamiento de la vivienda, añadiendo entre 20 a 40 centímetros de aislante térmico en techo, muro exterior y losa de piso, utilizando Lana mineral inyectada, poliéster y vidrio celular, los mismos materiales que se utilizaron como aislantes térmicos en la casa experimental de Muuratsalo, para poder realizar comparaciones precisas. Esto permitió reducir los Valores U de toda la envolvente de forma significativa, como puede verse en la Figura 55 :

VALORES-U DESPUÉS DE AÑADIR
EL AISLAMIENTO

Valor-U de los sistemas constructivos

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6

Maison Louis Carré / Clima: París / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m² a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m² a)

Calculo secundario: Conductividad térmica equivalente de los espacios de aire en calma -> (a la derecha
Capas en forma de cuña (aislamiento con pendiente
Capas de aire sin ventilar y áticos no calefactados)

Nr. elem. cons.	Denominación de elemento constructivo				Resistencia térmica superficial [m ² K/W]	¿Aislamiento interior?	¿Aislamiento interior?
01ud	Losa de Techo				Interior R_{in} : 0,10 Exterior R_{out} : 0,04		
Inclinación del elemento	1-Techo						
Adyacente a	1-Aire exterior						
Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ_2 [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ_3 [W/(mK)]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
Techo de hormigón/concreto	2,100	Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Lana mineral inyectada	0,040	160	160
Panel de madera	0,130					50	50
Lana mineral inyectada	0,040					400	13
Placa de cartón yeso	0,700					13	
Porcentaje superficie parcial 1	100%	Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	22,3
							cm
Suplemento al valor-U	W/(m ² K)					Valor-U:	1,616 W/(m ² K)
Nr. elem. cons.	Muro Exterior				Resistencia térmica superficial [m ² K/W]	¿Aislamiento interior?	¿Aislamiento interior?
02ud					Interior R_{in} : 0,13 Exterior R_{out} : 0,04		
Inclinación del elemento	2-Muro						
Adyacente a	1-Aire exterior						
Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ_2 [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ_3 [W/(mK)]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
Aplanado interior	0,350	Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Poliestireno	0,040	15	15
Pared de ladrillo	1,100					175	175
Poliestireno	0,040					300	20
Aplanado exterior	0,800					20	
Porcentaje superficie parcial 1	100%	Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	21,0
							cm
Suplemento al valor-U	W/(m ² K)					Valor-U:	2,519 W/(m ² K)
Nr. elem. cons.	Muro Exterior Grueso				Resistencia térmica superficial [m ² K/W]	¿Aislamiento interior?	¿Aislamiento interior?
03ud					Interior R_{in} : 0,13 Exterior R_{out} : 0,04		
Inclinación del elemento	2-Muro						
Adyacente a	1-Aire exterior						
Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ_2 [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ_3 [W/(mK)]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
Aplanado interior	0,350	Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Poliestireno	0,040	15	15
Pared de ladrillo	1,100					225	225
Poliestireno	0,040					300	20
Aplanado exterior	0,800					20	
Porcentaje superficie parcial 1	100%	Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	26,0
							cm
Suplemento al valor-U	W/(m ² K)					Valor-U:	2,260 W/(m ² K)
Nr. elem. cons.	Muro Terreno				Resistencia térmica superficial [m ² K/W]	¿Aislamiento interior?	¿Aislamiento interior?
04ud					Interior R_{in} : 0,13 Exterior R_{out} : 0,00		
Inclinación del elemento	2-Muro						
Adyacente a	2-Terreno						
Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ_2 [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ_3 [W/(mK)]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
Aplanado interior	0,350	Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Aislamiento térmico (vidrio celular)	0,036	15	15
Pared de hormigón	2,100					225	225
Aislamiento térmico (vidrio celular)	0,036					200	
Porcentaje superficie parcial 1	100%	Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	24,0
							cm
Suplemento al valor-U	W/(m ² K)					Valor-U:	3,571 W/(m ² K)
Nr. elem. cons.	Losa de Piso				Resistencia térmica superficial [m ² K/W]	¿Aislamiento interior?	¿Aislamiento interior?
05ud					Interior R_{in} : 0,17 Exterior R_{out} : 0,00		
Inclinación del elemento	3-Suelo						
Adyacente a	2-Terreno						
Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ_2 [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ_3 [W/(mK)]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
Parqué	0,130	Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Aislamiento térmico horizontal de losa de fundación (vidrio celular)	0,036	22	22
Pavimento	1,050					48	48
Losa de hormigón/concreto	2,100					160	160
Aislamiento térmico horizontal de losa de fundación (vidrio celular)	0,036					200	
Porcentaje superficie parcial 1	100%	Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	23,0
							cm
Suplemento al valor-U	W/(m ² K)					Valor-U:	2,169 W/(m ² K)
Nr. elem. cons.					Resistencia térmica superficial [m ² K/W]	¿Aislamiento interior?	¿Aislamiento interior?
05ud					Interior R_{in} : 0,17 Exterior R_{out} : 0,00		
Inclinación del elemento	3-Suelo						
Adyacente a	2-Terreno						
Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ_2 [W/(mK)]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ_3 [W/(mK)]	Espesor [mm]	Espesor [mm]
Parqué	0,130	Superficie parcial 1	λ_1 [W/(mK)]	Aislamiento térmico horizontal de losa de fundación (vidrio celular)	0,036	22	22
Pavimento	1,050					48	48
Losa de hormigón/concreto	2,100					160	160
Aislamiento térmico horizontal de losa de fundación (vidrio celular)	0,036					200	
Porcentaje superficie parcial 1	100%	Porcentaje superficie parcial 2		Porcentaje superficie parcial 3		Total	43,0
							cm
Suplemento al valor-U	W/(m ² K)					Valor-U:	0,166 W/(m ² K)

Figura 56 – Hoja Valores-U. Maison Louis Carré. Añadiendo aislante térmico en muros, techo y losa de piso. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Además, se sustituyeron todos los acristalamientos y marcos por componentes certificados por el Passivhaus Institut, como podemos en la Figura 57. En este caso, se decidió utilizar el acristalamiento certificado “0666gl03-AGC - iplus Advanced 1.0 (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)” ya que posee una muy buena propiedad aislante y a la vez otorga unas ganancia de calor por luz solar equilibradas, hay que tener en cuenta que en este emplazamiento la insolación es mucho mayor que el de Finlandia, por lo cual no se podía utilizar el mismo acristalamiento que se utilizó anteriormente ya que provocaba sobrecalentamiento durante el verano. Pero a pesar de que este cristal deja pasar más radiación solar que el que se utilizó en la Casa Experimental de Muuratsalo, no se corre riesgo de sobrecalentamiento, ya que esta vivienda también está rodeada de un denso bosque, por lo que la insolación está controlada de forma natural por el entorno vegetal. Por lo cual este acristalamiento permitió un equilibrio ideal según los cálculos arrojados por la herramienta PHPP 9:

Ventanas

Maison Louis Carré / Clima: París / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m² a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m² a)

Orientación de la superficie de la ventana	Radiación global (orientaciones principales)	Sombras	Suciedad	Incidencia de radiación no vertical	Proporción de acristalamiento	Valor g	Factor de reducción para radiación solar	Superficie de ventana	Valor-U de ventana	Superficie de acristalamiento	Radiación global promedio
Valores estándar -->	kWh/(m ² a)	0,75	0,95	0,85				m ²	W/(m ² K)	m ²	kWh/(m ² a)
Norte	98	0,24	0,95	0,85	0,78	0,42	0,15	16,19	0,61	12,56	99
Este	216	0,44	0,95	0,85	0,74	0,42	0,27	18,21	0,64	13,55	199
Sur	387	0,45	0,95	0,85	0,74	0,42	0,27	20,51	0,64	15,26	386
Oeste	217	0,31	0,95	0,85	0,81	0,42	0,20	27,58	0,59	22,36	235
Horizontal	339	1,00	0,95	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	339
Total o valor promedio de todas las ventanas						0,42	0,22	82,48	0,62	63,74	

Grados hora calefacción [kWh/a]:		70,3						Ir a lista de acristalamientos		Ir a lista de marcos de ventana				
Cantidad	Descripción	Desviación con respecto al norte	Ángulo de inclinación respecto a la horizontal	Orientación	Anchura	Altura	Selección a partir de hoja 'Superficies'	Instalado en	Acristalamiento	Marco	Valor g	Valor-U		Ψ Borda de vidrio
												Selección a partir de hoja 'Componentes'	Selección a partir de hoja 'Componentes'	
1	EDU_Vent_001_W	263,1	90	Oeste	0,517	2,280	24-O-19-Muro	0666gl03-AGC - iplus Advanced 1.0 (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0,42	0,44	0,55	0,025
1	EDU_Vent_002_W	263,1	90	Oeste	2,487	2,280	24-O-19-Muro	0666gl03-AGC - iplus Advanced 1.0 (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0,42	0,44	0,56	0,025
1	EDU_Vent_003_W	263,1	90	Oeste	2,763	2,280	24-O-19-Muro	0666gl03-AGC - iplus Advanced 1.0 (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate	0,42	0,44	0,56	0,025
Acristalamiento								Marco						
0666gl03-AGC - iplus Advanced 1.0 (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)								0640wi2-dPHT, deutsche PASSIVHAUS transfer - Delta plus cold climate - SWISSPACER Ultimate						

Figura 57 – Hoja Ventanas. Maison Louis Carré. Sustitución de ventanas por acristalamientos y marcos certificados por el Passivhaus Institut. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.2.5 AÑADIENDO ENERGÍA RENOVABLE

Después de realizar los cambios antes expuestos, se procedió a dotar a la vivienda de un sistema funcional de energía renovable que permitirá disminuir su dependencia de la energía primaria no renovable, como se puede observar en la Figura 58, se decidió instalar una bomba de calor, la cual fue suficiente para cubrir las necesidades de calefacción de la vivienda. Hay que recordar que, en el caso anterior, la Casa Experimental de Muuratsalo, hubo que añadir una caldera al sistema por las condiciones climáticas tan adversas de Finlandia que aumentaban de forma significativa la demanda de calefacción de la vivienda. Pero en este caso, en las afueras de París, el clima es mucho más benévolos por lo cual, no hubo necesidad de utilizar una caldera.

ENERGÍA PRIMARIA RENOVABLE ANTES DE SER OPTIMIZADA

Energía Primaria Renovable PER				
Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m ² / Calefacción: 19,1 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / 1				
Selección del sistema(s) de generación de calor		Margen de contribución (energía útil)		
Tipo generador de calor primario		Calefacción	ACS	
2-Bomba(s) de calor		100%	100%	
		EP		CO ₂
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)
	1-Factores EP (no-renewable) Certificación PHI		1-Factores CO2 GEMIS (Alemania)	
34,5		66,3		13,6

ENERGÍA PRIMARIA RENOVABLE DESPUÉS DE SER OPTIMIZADA

Energía Primaria Renovable PER				
Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m ² / Calefacción: 460,8 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 25 %				
Selección del sistema(s) de generación de calor		Margen de contribución (energía útil)		
Tipo generador de calor primario		Calefacción	ACS	
5-Directa eléctrica		100%	100%	
		EP		CO ₂
Valor específico PER	Factor EP	Valor EP	Factor emisiones CO ₂ (CO ₂ -eq)	Emisiones CO ₂ eq
kWh/(m ² a)	kWh/kWh	kWh/(m ² a)	kg/kWh	kg/(m ² a)
	1-Factores EP (no-renewable) Certificación PHI		1-Factores CO2 GEMIS (Alemania)	
793,8		1228,2		251,3

Figura 58 - Energía Primaria Renovable (PER) antes y después de ser implementada. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Bomba de calor geotérmica (sondas y colectores geotérmicos)

Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m²a)

Tipo de edificio:	Vivienda
Superficie referencia energética A _{SRE} :	474 m ²
Sondas geotérmicas	
Configuración del campo de la sonda	A Sonda individual
Profundidad de sonda	H 40 m
Distancia entre sondas	B 1 m
Profundidad (z=H/2)	z 20 m
Tipo de sonda	A Doble-U
Radio de la perforación	r _b 0,090 m
Radio interno del tubo	r _i 0,013 m
Radio exterior del tubo	r _a 0,016 m
Distancia entre tubos	BU 0,070 m
Radio interno del tubo (coaxial)	r _{i2} 0,050 m
Radio exterior del tubo con recubrimiento	r _{a2} 0,052 m
Conductividad térmica del tubo	λ _R 0,42 W/(mK)
Conductividad térmica de relleno	λ _F 2,00 W/(mK)
Constante de tiempo de la sonda	t _p 2058 d
Resistencia interna de la perforación	R _a 0,169 Km/W
Resistencia de la perforación	R _b 0,066 Km/W
Terreno	
Tipo de terreno	J Otros terreno
Densidad del terreno	ρ _E 2000 kg/m ³
Capacidad térmica del terreno	c _{pE} 1000 J/(kgK)
Conductividad térmica del terreno	λ _E 2,0 W/(mK)
Conductancia de temperatura terreno	a _E 0,000001 m/s ²
Gradiente de temperatura del terreno	ΔT _G 0,022 K/m
Propiedades de la salmuera	
Salmuera (características a 2°C)	E Salmuera
Densidad de la salmuera	ρ _S 1036 kg/m ³
Viscosidad dinámica de la salmuera	η _S 0,0052 kg/(ms)
Capacidad térmica salmuera	c _{pS} 3815 J/(kgK)
Conductividad térmica de salmuera	λ _S 0,4405 W/(mK)
Salmuera - flujo másico	m _S 0,6 kg/s
Colectores geotérmicos	
Radio interno del tubo	r _i 0,013 m
Radio exterior del tubo	r _a 0,016 m
Conductividad térmica del tubo	λ _r 0,420 W/(mK)
Profundidad tubo	Z _{pipe} 20 m
Profundidad de manto freático	Z _{gw} m
Distancia entre tubos	D 0,4 m
Área base	80 m ²
Superficie exterior tubo	20,1 m ²
Longitud tubo	L 200,0 m
Propiedades de la salmuera	
Salmuera (características a 2°C)	A Etilenglicol 25%
Densidad de la salmuera	ρ _S 1052 kg/m ³
Viscosidad dinámica de la salmuera	η _S 0,0052 kg/(ms)
Capacidad térmica salmuera	c _{pS} 3950 J/(kgK)
Conductividad térmica de salmuera	λ _S 0,48 W/(mK)
Salmuera - flujo másico	m _S 0,5 kg/s
U * A	2370 W/K
Clima	
Duración del periodo	365 d
Temperatura media de la superficie del terreno T _{m0}	11,3 °C
Amplitud de temperatura en la superficie T ₁	7,6 °C
Cambio superficial de fases	t ₀₂ 36 d

Figura 59 - Especificaciones Generales del sistema de Bomba de Calor geotérmica. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

De la misma forma que se hizo en el caso de la Casa experimental de Muuratsalo, para definir las propiedades del terreno para el cálculo del rendimiento de la bomba de calor, se utilizaron valores de referencia extraídos de un archivo de ejemplo proporcionado por el Passivhaus Institut para este fin, ya que no se disponían de estudios de suelos del lugar donde está localizada la vivienda. De esa manera se pudo realizar una estimación del rendimiento de una bomba de calor estándar, como se puede observar en la Figura 59 y Figura 60:

Bomba de calor geotérmica (sondas y colectores geotérmicos)

Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m²a) / Frec. sobrecaleamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m²a)

Características del terreno		Conductividad térmica [W/(mK)]	Densidad [kg/m ³]	Capacidad térmica [J/(kg K)]	Capacidad térmica [MJ/(m ³ K)]	Conductividad temperatura [10-7 m ² /s]	Fuente	Resultado cálculo sonda geotérmica
A	Arena, 9% humedad	0,980	1440	1507	2,170	4,520	[Neiß 1977]	Perforación Temperatura
B	Arena, 13% humedad	1,500	1600	1800	2,880	5,210	[Neiß 1977]	Mes °C
C	Terreno, grava	0,520	2000	1840	3,680	1,410	[VDI 1984]	1 11,7
D	Suelo arcilloso, 36% humedad	2,300	1650	2847	4,700	4,900	[Neiß 1977]	2 11,7
E	Arcilla	1,280	1500	880	1,320	9,700	[VDI 1984]	3 11,7
F	Arcilla / limo	2,200	2550	882	2,250	9,780	[VDI 2000]	4 11,7
G	Pizarra	2,100	2700	870	2,350	8,940	[VDI 2000]	5 11,7
H	Limo	1,500	1920	2938	5,640	2,660	[ISO 13370]	6 11,8
I	Roca	3,500	2500	2500	6,250	5,600	[ISO 13370]	7 11,8
J	Otros terreno	2,000	2000	1000	2,000			8 11,8
								9 11,8
								10 11,8
								11 11,8
								12 11,7

Propiedades de la salmuera		Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]	Capacidad térmica [J/(kg K)]	Conductividad térmica [W/(mK)]	Viscosidad dinámica [kg/(ms)]
A	Etilenglicol 25%	2	1052	3950	0,480	0,0052
B	Carbonato de potasio	2	1265	2941	0,544	0,0031
C	Formiato de potasio	2	1226	3190	0,534	0,00237
D	Agua	2	997	4190	0,590	0,001307
E	Salmuera	2	1036	3815	0,441	0,005

Figura 60 - Propiedades del Terreno y la salmuera utilizados para el cálculo de la bomba de calor geotérmica. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.2.6 COMPARANDO RESULTADOS

Una vez realizados todos los ajustes antes mencionados se pudo comprobar una reducción sustancial en la demanda de calefacción de la vivienda. Como ya mencionamos anteriormente, existe una hoja dedicada a calcular las cargas calorías.

Primero se compararán los resultados obtenidos en la hoja de cálculo de la demanda de calefacción utilizando el método anual. Como podemos ver en los siguientes gráficos, hay una reducción muy importante de la demanda de calefacción, sobre todo en los meses de inviernos, llegan a reducirse en ese período en más de un 90%.

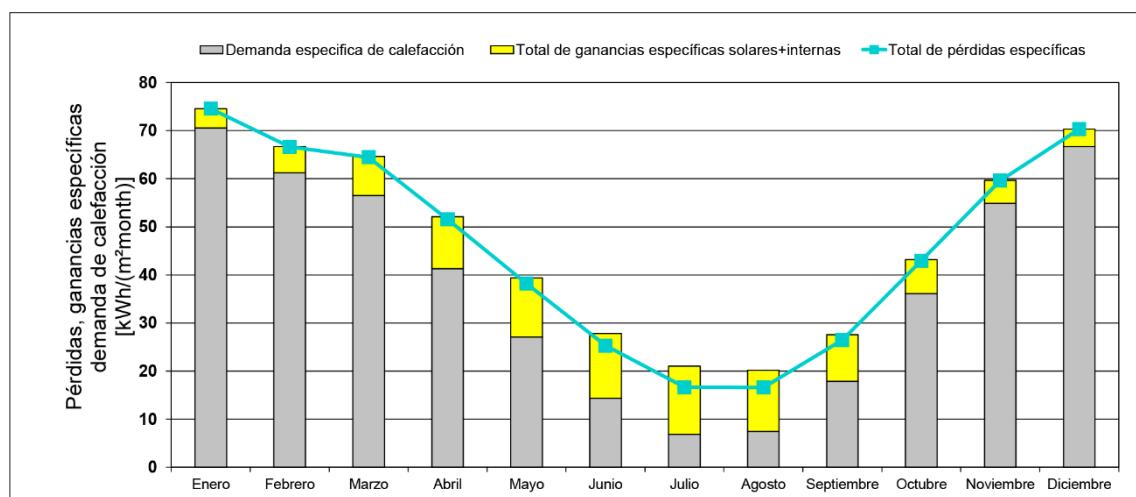


Gráfico 8 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción antes de ser optimizada. Maison Louis Carré.
Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

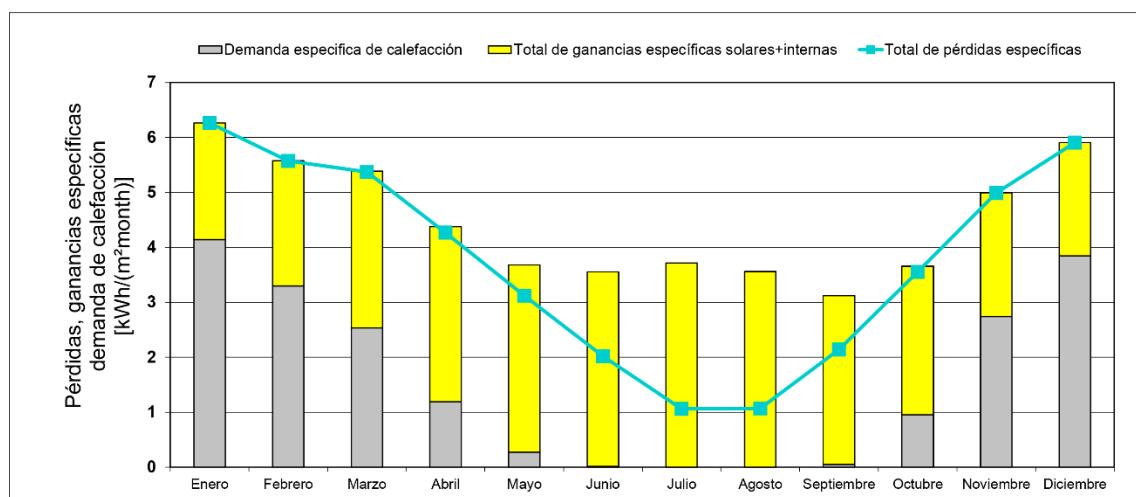


Gráfico 9 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción después de ser optimizada. Maison Louis Carré.
Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Los gráficos anteriores se alimentan de los datos de las Tabla 12 y Tabla 13, en ellas podemos observar que demanda específica de calefacción, después de haber mejorado el aislamiento térmico de la vivienda se ha reducido considerablemente, es notorio el período comprendido entre Junio y Agosto donde la calefacción, gracias a la mejora de la aislación térmica es completamente innecesaria. Además, gracias a las mejoras realizadas, ahora en pleno invierno, en el mes de enero, solo se requieren 4,1 kWh/m², cuando anteriormente la demanda de calefacción era de 70,6 kWh/m², es una reducción del 94%, algo extremadamente positivo.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Año
Grados-hora de calefacción, ex	13,0	11,5	10,7	8,3	5,7	3,4	1,8	2,0	4,1	7,3	10,6	12,4	91
Grados-hora de calefacción, ter	5,3	5,1	5,6	5,1	4,7	3,9	3,4	3,0	2,9	3,4	3,8	4,7	51
Pérdidas hacia el exterior	29522	25964	24331	18780	12912	7716	4139	4524	9311	16644	24028	28185	206058
Pérdidas hacia el terreno	5828	5623	6237	5673	5199	4283	3751	3354	3234	3717	4239	5153	56292
Total de pérdidas específicas	74,5	66,6	64,5	51,6	38,2	25,3	16,6	16,6	26,5	42,9	59,6	70,3	553,2
Ganancias solares - norte	9	14	22	33	45	53	53	41	26	19	11	8	332
Ganancias solares - este	30	60	97	135	151	176	185	160	119	71	39	22	1245
Ganancias solares - sur	95	145	189	201	199	194	218	235	221	188	137	88	2109
Ganancias solares - oeste	46	73	128	187	201	234	246	229	162	111	63	40	1720
Ganancias solares - horizontal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias solares - opaco	941	1597	2651	3804	4468	4954	5234	4622	3310	2202	1273	777	35833
Ganancias internas de calor (G)	778	703	778	753	778	753	778	778	753	778	753	778	9162
Total de ganancias específicas	4,0	5,5	8,2	10,8	12,3	13,4	14,2	12,8	9,7	7,1	4,8	3,6	106,3
Grado de aprovechamiento	99%	99%	98%	95%	90%	82%	69%	72%	89%	97%	99%	100%	87%
Demanda de calefacción	33462	29023	26790	19597	12828	6812	3262	3518	8478	17110	26016	31634	218531
Demandas específicas de calefacción	70,6	61,2	56,5	41,3	27,1	14,4	6,9	7,4	17,9	36,1	54,9	66,7	460,8

Tabla 12 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción antes de ser optimizada. Maison Louis Carré.
Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Año
Grados-hora de calefacción, ex	13,1	11,5	10,7	8,3	5,6	3,3	1,7	1,9	4,0	7,3	10,6	12,4	90
Grados-hora de calefacción, ter	5,3	5,1	5,6	5,1	4,7	3,9	2,2	1,8	2,9	3,4	3,8	4,7	48
Pérdidas hacia el exterior	2540	2227	2087	1606	1096	641	328	360	777	1411	2053	2418	17543
Pérdidas hacia el terreno	430	415	461	419	384	316	176	147	239	275	313	381	3955
Total de pérdidas específicas	6,3	5,6	5,4	4,3	3,1	2,0	1,1	1,1	2,1	3,6	5,0	5,9	45,3
Ganancias solares - norte	8	13	20	30	41	49	49	38	24	18	10	7	306
Ganancias solares - este	29	58	93	130	146	169	178	153	114	68	38	21	1197
Ganancias solares - sur	91	139	181	192	190	185	209	225	211	180	131	84	2018
Ganancias solares - oeste	42	68	119	175	187	219	229	213	151	103	59	37	1604
Ganancias solares - horizontal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ganancias solares - opaco	57	97	162	232	273	303	320	282	202	134	77	47	2188
Ganancias internas de calor (G)	778	703	778	753	778	753	778	778	753	778	753	778	9162
Total de ganancias específicas	2,1	2,3	2,9	3,2	3,4	3,5	3,7	3,6	3,1	2,7	2,3	2,1	34,7
Grado de aprovechamiento	100%	100%	99%	97%	84%	57%	29%	30%	68%	96%	100%	100%	76%
Demanda de calefacción	1964	1565	1201	565	130	8	0	0	25	453	1300	1824	9035
Demandas específicas de calefacción	4,1	3,3	2,5	1,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	2,7	3,8	19,1

Tabla 13 - Perdida, Ganancias Específicas y Demanda de calefacción después de ser optimizada. Maison Louis Carré.
Fuente: Elaboración propia, basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

RESULTADOS PREVIOS

Demanda de calefacción (método mensual)										Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a				Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6a											
Maison Louis Carré / Clima: París / SRE: 474 m ² / Calefacción: 19,1 kWh/(m ² a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m ² a)																									
La suma de los períodos de calefacción calculados mediante el método mensual se presentan en esta parte																									
Temperatura interior: 20 °C																									
Tipo de edificio: Vivienda																									
Superficie de referencia energética A _{Ref} : 474,2 m ²																									
Capacidad específica: 60 Wh/(m ² K)																									
Por m ² de SRE										Por m ² de SRE				Por m ² de SRE											
G _i kWh/a										G _i kWh/a				G _i kWh/a											
5655 = 11,92										511399 = 247,57				5489 = 11,58											
230 = 0,49										68972 = 145,44				50802 = 107,13											
3828 = 8,07										7219 = 15,22				976 = 2,06											
3402 = 7,17										-832 = -1,75				0,00 = 0,00											
37,2 kWh/(m ² a)										250025 = 527,2				527,2 kWh/(m ² a)											
Pérdidas de calor por transmisión QT										Altura libre habitación m				Altura libre habitación m											
Caudal de aire efectivo V _y										37,2 kWh/(m ² a)				527,2 kWh/(m ² a)											
A _{SRE} m ³										37,2 kWh/(m ² a)				527,2 kWh/(m ² a)											
474 = 2,50										527,2 kWh/(m ² a)				527,2 kWh/(m ² a)											
n _{V,ext} t/h										n _{V,ext} t/h				n _{V,ext} t/h											
0,300 * (1- 0%) * (1- 0,88) + 0,046 = 0,083										0,346 = 0,00				0,346 = 0,00											
n _{V,terreno} t/h										n _{V,terreno} t/h				n _{V,terreno} t/h											
1186 * 0,083 = 96,12										12324 = 26,0				0 = 0,0											
1186 * 0,000 = 0,00										12324 = 26,0				12324 = 26,0											
Pérdidas de calor ventilación Q _{Vent}										Total 2825				Total 2825											
Q _T kWh/a										Factor de reducción noche y fin de semana ahorro				Factor de reducción noche y fin de semana ahorro											
17663 + 2825 * 1,0 = 20488										1,0 = 262349				1,0 = 262349											
43,2 kWh/(m ² a)										553,2 kWh/(m ² a)				553,2 kWh/(m ² a)											
Factor de reducción ver hoja 'Ventanas'										Radiación global kWh/a				Radiación global kWh/a											
0,15 * 0,42 = 16,2										220 = 332				865 = 1245											
0,27 * 0,42 = 18,2										674 = 2109				674 = 1720											
0,27 * 0,42 = 20,5										743 = 35833				0 = 0											
0,20 * 0,42 = 27,6										1161 = 41238				88% = 87%											
0,00 * 0,00 = 0,0										24,2 = 92,4				11453 = 43818											
43,2 kWh/(m ² a)										19 = 461				19 = 461											
Q _p - Q _G = 9035										Q _p - Q _G = 218531				Q _p - Q _G = 218531											
15 = 19										(Sí) No				(Sí) No											
Requerimiento cumplido?										No				No											
Demandas de calefacción Q _{Cal}										461 kWh/(m ² a)				461 kWh/(m ² a)											
Valor máx. permitido																									

Figura 61 - Comparativa hoja demanda de calefacción (método mensual). Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración propia. Basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

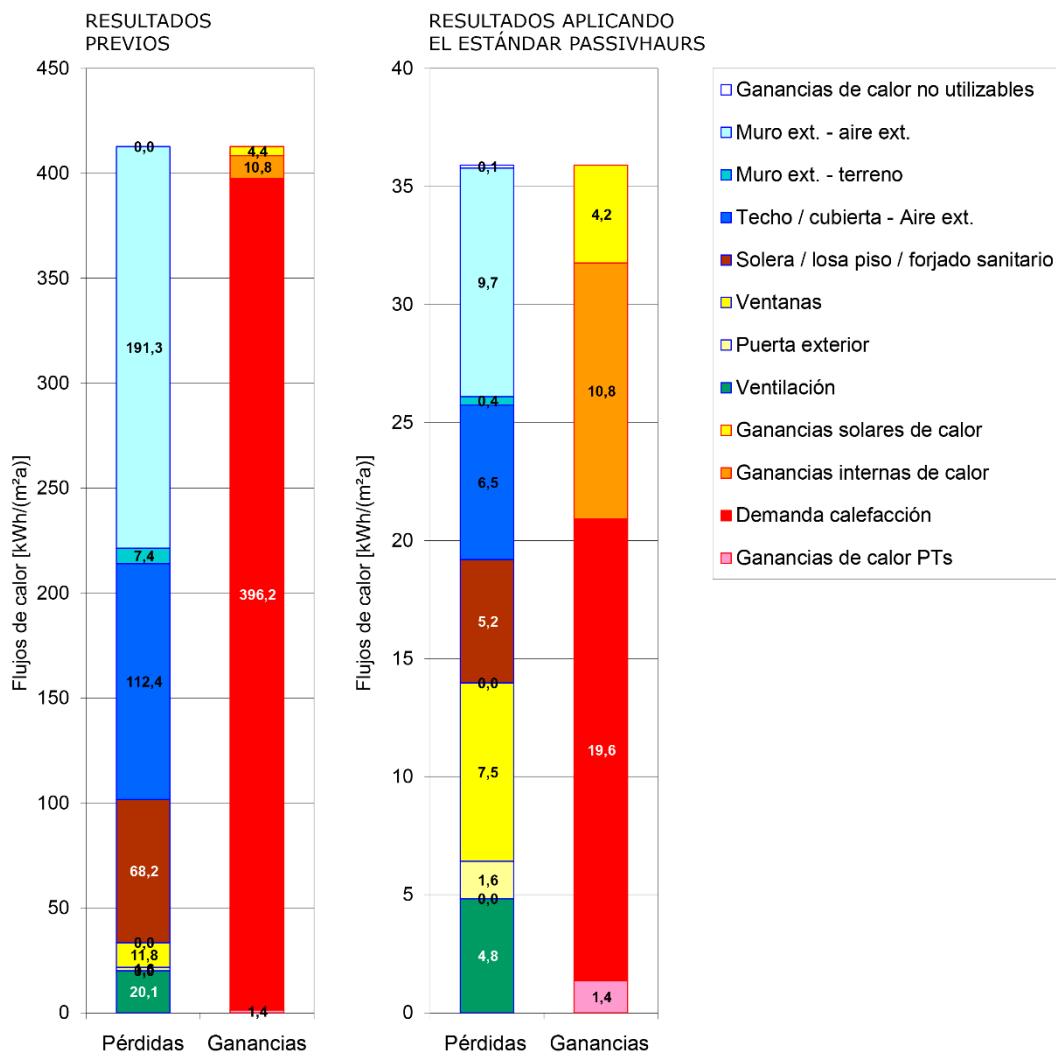


Gráfico 10 - Comparativa de Flujos de Calor, Ganancias y Pérdidas según el método de cálculo anual antes y después de la optimización. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Si consultamos el Gráfico 10 en la hoja de calefacción por método anual, observamos una reducción considerable de las perdidas en calor, gracias a la utilización de acristalamiento certificado por el Passivhaus Institut y a la mejora del aislante térmico de la envolvente. En la Figura 62 podemos verificar como, después de aplicar el estándar Passivhaus, la demanda de calefacción anual se redujo de 396 kWh/(m²a) a 20 kWh/(m²a), esto representa una reducción de casi el 95% en la demanda de calefacción anual.

RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

RESULTADOS PREVIOS

Demandas de calefacción (método anual)

Maison Louis Carré / Clima: Paris / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m²a) / Frec. sobrecaleamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m²a)

Figura 62 – Comparativa hoja de Demanda de Calefacción Anual antes y después de la optimización. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

RESULTADOS APLICANDO EL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

RESULTADOS PREVIOS

Carga de calefacción

Maison Louis Carré / Clima: París / SRE: 474 m² / Calefacción: 19,1 kWh/(m²a) / Frec. sobrecalentamiento: 6 % / PER: 34,5 kWh/(m²a)

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6

Casa Pasiva con PHPP Versión 9.6

Temperatura interior: 20 °C										Temperatura interior: 20 °C									
Tipo de edificio: Vivienda										Tipo de edificio: Vivienda									
Superficie de referencia energética A _{ref} : 474,2 m ²										Superficie de referencia energética A _{ref} : 474,2 m ²									
Carga de calefacción																			
Temperatura de cálculo	Radiación:	Norte	Este	Sur	Oeste	Horizontal													
Situación meteorológica 1: -2,8 °C		10	15	25	15	20	W/m ²												
Situación meteorológica 2: -0,7 °C		5	10	10	10	10	W/m ²												
Temp. del terreno considerada		12,4	°C																
Elemento constructivo	Zona de temperatura	Superficie m ²	Valor U W/(m ² K)	Factor Siempre 1 (excepto "X")	Dif. de temperatura 1 K	Dif. de temperatura 2 K					P _{T 1} W		P _{T 2} W					P _{T 1} W	P _{T 2} W
Muro ext. - aire ext.	A	515,3	0,127	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=	1484	o bien	1347	=	29355	o bien	26646		
Muro ext. - terreno	B	30,2	0,171	*	1,00	*	7,6	o bien	7,6	=	39	o bien	39	=	818	o bien	818		
Techo / cubierta - Aire ext.	A	469,0	0,094	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=	1005	o bien	912	=	17246	o bien	15654		
Solera / losa piso / forjado sanitario	B	460,9	0,166	*	1,00	*	7,6	o bien	7,6	=	580	o bien	580	=	7566	o bien	7566		
	A	*	*	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=		o bien		=		o bien			
	A	*	*	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=		o bien		=		o bien			
Ventanas	A	82,5	0,617	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=	1158	o bien	1051	=	1805	o bien	1638		
Puerta exterior	A	20,6	0,520	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=	244	o bien	222	=	244	o bien	222		
Puentes térmicos exteriores (longitud en m)	A	728,7	-0,013	*	1,00	*	22,8	o bien	20,7	=	-208	o bien	-189	=	-208	o bien	-189		
Puentes térmicos perímetro (longitud en m)	P	*	*	*	1,00	*	7,6	o bien	7,6	=		o bien		=		o bien			
Puentes térmicos piso (longitud en m)	B	*	*	*	1,00	*	7,6	o bien	7,6	=		o bien		=		o bien			
Muro divisorio entre viviendas	I	*	*	*	1,00	*	3,0	o bien	3,0	=		o bien		=		o bien			
Carga de calor por transmisión P_T										Total	=	4302	o bien	3962	=	56826	o bien	52355	
Sistema de ventilación:										A _{ref} m ²	Altura libre de la habitación m			4.302,00 W		56.826,00 W			
Caudal de aire efectivo V _v		474,2	*	2,50	=	1186													
Eficiencia del recuperador de calor del intercambiador de calor	T _{rec} 88%			eficiencia del ITA 0%															
Tasa de renovación de aire energéticamente efectiva n _{vent}	n _{vent} 0,105	1/h	+	n _{vent} 0,300	1/h	*	(1- 0,88)	o bien	0,88	=	1/h 0,142	o bien	1/h 0,142	=	1/h 0,405	o bien	1/h 0,405		
Carga de calor ventilación P _{Vent}	V _v m ³	n _v 1/h	n _v 1/h	φ _{rec} 0,33 Wh/(m ² K)		Dif. de temperatura 1 K	Dif. de temperatura 2 K			P _{T 1} W		P _{T 2} W				P _{T 1} W	P _{T 2} W		
	1185,5	*	0,142	o bien	0,142	*	22,8	o bien	20,7	=	1265	o bien	1148	=	3605	o bien	3272		
Total de cargas de calor P _T										P _{T 1} W		P _{T 2} W				P _{T 1} W	P _{T 2} W		
P _{T 1} + P _{Vent}										=	5567	o bien	5110	=	60431	o bien	55627		
Orientación de la superficie	Superficie m ²	Valor g (Radiación perpendicular)	Factor de reducción (Compare hoja "Ventanas")	Radiación 1 W/m ²		Radiación 2 W/m ²				P _{T 1}		P _{T 2}				P _{T 1}	P _{T 2}		
Norte	16,2	*	0,4	*	0,15	*	10	o bien	5	=		5.567,00 W							
Este	18,2	*	0,4	*	0,27	*	14	o bien	10	=									
Sur	20,5	*	0,4	*	0,27	*	25	o bien	10	=	59	o bien	24	=	61	o bien	25		
Oeste	27,6	*	0,4	*	0,20	*	16	o bien	10	=	38	o bien	24	=	40	o bien	26		
Horizontal	0,0	*	0,0	*	0,40	*	20	o bien	10	=	0	o bien	0	=	0	o bien	0		
Cargas térmicas solares P_S										Total	=	135	o bien	73	=	143	o bien	77	
Carga interna de calor P _I				Potencia específica W/m ²	A _{ref} m ²	P _{I 1} W		P _{I 2} W							P _{I 1} W	P _{I 2} W			
Cargas térmicas (ganancias) P _G					1,7	*	474	=	809	o bien	809	=	809	o bien	809	=	809	o bien	809
P _{G 1} + P _{I 1}										P _{G 1} W		P _{G 2} W				P _{G 1} W	P _{G 2} W		
										=	944	o bien	881	=	951	o bien	885		
P _{P - P_G}										P _P - P _G	=	4623	o bien	4229	=	59480	o bien	54742	
Carga de calefacción P _{Cal}																			
Carga de calefacción específica PH / A _{TFA}																			
Introducción temp. máx. aire impulsión 52 °C																			
Temp. máx. aire impulsión θ _{adms,max} 52 °C																			
Temp. del aire de impulsión sin aporte de calor a θ _{adms,min}																			
Para comparar: carga máx. de calor trasportable a través del aire de impulsión P _{Impuls,Max}										=	4086	W específico: 8,6 W/m ²				6426	W específico: 13,6 W/m ²		
¿Calefactable a través del aire de impulsión?																			

Figura 63 - Comparativa Hoja de Carga de Calefacción, antes y después de ser optimizada. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basada en la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

6.2.7 RESULTADO FINAL

Luego de mejorar el aislamiento de toda la envolvente, sustituir las ventanas por nuevos acristalamientos y marcos certificados, añadir un intercambiador de calor y una bomba de calor geotérmica, se ha obtenido el siguiente resultado que puede ser verificado en la hoja de comprobación en de la herramienta PHPP 9:

Casa Pasiva Comprobación			
	Edificio: Maison Louis Carré Calle: 2 Chemin du Saint-Sacrement CP / Ciudad: 78490 Bazoches-sur-Guyonne Provincia/País: Yvelines FR-Francia Tipo de edificio: Vivienda Datos climáticos: FR0001a-Paris Zona climática: 3: Fría-templada Altitud de la localización: 134 m		
Arquitectura: Alvar Aalto Arquitectura Calle: Mannerheimintie 30 CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/País: Ostrobothnia del Sur FI-Finlandia	Propietario / cliente: Louis Carré Calle: 2 Chemin du Saint-Sacrement CP / Ciudad: 78490 Bazoches-sur-Guyonne Provincia/País: Yvelines FR-Francia		
Consult. energética: Consultora INO Calle: Rúa Alcalde Manuel Casas S/N CP / Ciudad: 15000 A Coruña Provincia/País: A Coruña ES-España	Ingeniería: Alvar Aalto Ingenieria Calle: Mannerheimintie 30 CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/País: Ostrobothnia del Sur FI-Finlandia		
Año construcción: 1959 Nr. de viviendas: 1 Nr. de personas: 3,4	Certificación: Passive House Institute Calle: Rheinstr. 44/47 CP / Ciudad: 64289 Darmstadt Provincia/País: Darmstadt		
	Temp. interior invierno [°C]: 20,0 Temp. interior verano [°C]: 25,0 Ganancias internas de calor (GIC); caso calefacción [W/m ²]: 2,2 GIC caso refrig. [W/m ²]: 2,2 Capacidad específica [Wh/K por m ³ de SRE]: 60 Refrigeración mecánica:		
Valores específicos del edificio con referencia a la superficie de referencia energética			
Calefacción	Superficie de referencia energética m ² 474,2 Demanda de calefacción kWh/(m ² a) 19 Carga de calefacción W/m ² 10	≤ Criterios alternativos Criterio 15 - 10	¿Cumplido? ² Sí
Refrigeración	Demanda refrigeración & deshum. kWh/(m ² a) - Carga de refrigeración W/m ² - Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C) % 6 Frecuencia excesivamente alta humedad (> 12 g/kg) % 0	≤ - - -	-
Hermeticidad	Resultado ensayo presión n ₅₀ 1/h 0,6	≤ 0,6	Sí
Energía Primaria no renovable (EP)	Demanda EP kWh/(m ² a) 66	≤ 120	Sí
Energía Primaria Renovable (PER)	Demanda PER kWh/(m ² a) 35 Generación de Energía Renovable (en relación con área de la huella del edificio proyectado) kWh/(m ² a) 0	≤ - -	-

² Celda vacía: Falta dato; '-' Sin requerimiento

Figura 64 - Hoja Comprobación con los resultados finales después de haber optimizado el consumo de calefacción y energía primaria no renovable de la edificación. Maison Louis Carré. Fuente: Elaboración Propia. Basada la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

Como se puede observar en la Figura 64, la cual muestra la hoja Comprobación de la herramienta PHPP 9, desarrollada por el Passivhaus Institut, se logró reducir la demanda de calefacción a 19 kWh/(m²a), algo notable si tenemos en cuenta que

inicialmente su valor ascendía a 461 kWh/(m²a) (ver Figura 51), además, se redujo también la Carga de Calefacción que pasó de 125 W/m² (ver Figura 51) a 10 W/m² (ver Figura 64), y es justamente este último punto el que permitió certificar la vivienda como Passivhaus, ya que su carga de calefacción es igual o inferior a 10 W/m², criterio que es suficiente para cumplir con el estándar, a pesar de no haber logrados los 15 kWh/(m²a) en la demanda de Calefacción. En realidad, solo es necesario cumplir alguno de esos dos criterios, y en este caso, a diferencia del de la casa experimental en Muuratsalo, hemos conseguido certificar la vivienda.

Quizás uno de los factores que nos permitió conseguir certificar esta vivienda era el hecho de estar implantada en un clima más cálido que el de Muuratsalo, ya que, con menos centímetros de aislante térmicos, se consiguió una reducción efectiva de la demanda de calefacción. Y quizás otro factor a considerar, es que la geometría de la Maison Louis Carré, es mucho más compacta que la de la casa experimental, este factor de compacidad, que puede ser consultado en el Tabla 14 del próximo capítulo, aunque parezca irrelevante, determina la efectividad del aislamiento que se pretenda instalar en la envolvente, ya que por muy buen aislante que se utilice, o los centímetros que tenga, si la superficie a proteger está sobredimensionada, las pérdidas de calor se van dar, ya que no hay ninguna material aislante capaz de conseguir aislar una vivienda al 100%.

Además, de forma parecida a lo que se hizo en la Casa Experimental, gracias a la utilización de la herramienta de cálculo de balance energético desarrollada por el Passivhaus Institut, se ha logrado dotar a la vivienda de una bomba de calor que han permitido reducir su dependencia de la energía primaria no renovable, permitiendo que también se cumpla del certificado Passivhaus en lo que corresponde al límite de consumo de energía primaria no renovable, la cual pasó de 1.228 kWh/m²a (ver Figura 51), a tan solo 66 kWh/m²a (ver Figura 64), eso representa una reducción de casi el 95% de consumo de energía primaria no renovable.

6.3. LA COMPACIDAD, UNA CARACTERÍSTICA DETERMINANTE.

Luego de haber obtenido los distintos resultados al aplicar el Estándar Passivhaus en cada vivienda y darnos cuenta de las diferencias de rendimiento que se obtuvieron en cada una de ellas, se decidió estudiar brevemente la geometría de estas edificaciones, para intentar determinar si realmente son tan importantes las diferencias de compacidad entre las viviendas y si esto podría estar detrás de la imposibilidad de certificar la Casa Experimental de Muuratsalo.

Por lo cual se procedió a extraer de cada modelo tridimensional la superficie total de la envolvente y el volumen de cada edificación y con dichos datos se procedió a calcular las relaciones entre superficie y volumen de cada edificación, además de su índice de compacidad. Para ello se necesitó calcular la superficie de una esfera que fuera capaz de albergar el volumen de cada vivienda. Esto se logró utilizando las funciones que determinan el volumen y las superficies de una esfera:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$$A = 4\pi R^2$$

Para así conocer las superficies mínimas necesarias para envolver el volumen de aire de cada vivienda. Este cálculo es importante ya que la esfera es la forma geométrica con mejor relación volumen/superficie y por lo tanto con una compacidad máxima. De esta forma, al calcular las superficies de estas esferas virtuales, se pudo definir el índice de compacidad que no es otra cosa que la superficie de la vivienda dividida entre esa superficie ideal de las esferas que se calcularon. El resultado lo podemos ver en siguiente página en la Tabla 14 :

	Maison Louis Carré	Casa Experimental en Muuratsalo
Volumen	2444,65 m ³	566,96 m ³
Superficie Real de la envolvente	1578,56 m ²	632,89 m ²
Radio Esfera Virtual	8,357 m	5,134 m
Superficie esfera virtual (Superficie Optima)	877,60 m ²	331,27 m ²
Índice de Compacidad	1,80	1,91
Relación Superficie/Volumen	0,646 m ² /m ³	1,116 m ² /m ³
Relación Superficie/Volumen entre ambas viviendas	-42,15%	72,87%

Tabla 14 – Diferencias de compacidad entre la casa experimental en Muuratsalo y la Maison Louis Carré.

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver en la Tabla 14, la Maison Louis Carré tiene un índice de compacidad inferior que el de la Casa Experimental en Muuratsalo. Este índice se calculó dividiendo la superficie real de la envolvente entre la superficie óptima para cada vivienda. Recordemos que la superficie óptima es la de una esfera con el mismo volumen que el de la vivienda, por tanto, para alcanzar la compacidad máxima, la vivienda tendría que ser una esfera perfecta y en ese caso su índice de compacidad sería igual a 1, por lo cual, mientras más bajo sea el índice de compacidad de una geometría, mayor será su eficiencia a nivel energético ya que tendrá menos superficie expuesta a la intemperie, por cada metro cúbico de espacio útil y por tanto existirá menor tendencia a disipar el calor al exterior.

Por lo cual la Maison Louis Carré es más eficiente que la Casa Experimental en Muuratsalo, ya que su índice de compacidad está más cercano a 1, en su caso es de 1,80, mientras que el de la Casa Experimental en Muuratsalo es de 1,91. Esta pequeña diferencia tiene grandes consecuencias en la relación Superficie/Volumen donde podemos ver que en el caso de la Casa Experimental en Muuratsalo se ubica en 1,116 m²/m³, un 72,87% más que en el caso de la Maison Louis Carré que solo tiene 0,646 m²/m³.

Por lo cual, con este simple cálculo, hemos podido verificar como la Casa Experimental en Muuratsalo es afectada de forma negativa por su geometría, ya que a mayor superficie en contacto con la intemperie, mayores pérdidas de calor. Este, y las temperaturas extremadamente bajas en la localidad de Muuratsalo, probablemente sea el motivo por el cual, a pesar de aumentar el grosor del aislante térmico en la vivienda, nunca se llegó a reducir la demanda de calefacción al nivel necesario para lograr la certificación.

6.4. LA OPCIÓN DE CERTIFICAR LAS EDIFICACIONES COMO ENERPHIT.

Conociendo las dificultades añadidas a la hora de certificar una vivienda como Passivhaus cuando esta ha pasado por un proceso de rehabilitación, el Passivhaus Institut ha creado un certificado adicional específico para edificios antiguos rehabilitados. Su nombre es EnerPHit y añade una serie de criterios alternativos que permiten certificar la vivienda de acuerdo a la zona climática donde se encuentre (ver Tabla 15), algo muy positivo ya que considera el efecto negativos de los climas extremadamente fríos en la posibilidad de cumplir con el límite de demanda de calefacción, generando una escala que, en el caso de la Casa experimental en Muuratsalo, situaría el límite de demanda de calefacción en 30 kWh/(m²a), ya que se encuentra en un clima frio. Esto nos permitiría certificar la Casa experimental en Muuratsalo si esta cumpliera con ese límite, pero después de las mejoras anteriormente realizadas el resultado fue una

demandas de calefacción de 73 kWh/(m²a), por lo cual este criterio no podemos cumplirlo, pero afortunadamente, según el Passivhaus Institut, tenemos la opción de certificar la vivienda tomando en consideración la calidad de sus componentes, cumpliendo los límites que se establecen en la Tabla 17 (Passivhaus Institut 2016).

Zona climática de acuerdo al PHPP	Calefacción	Refrigeración
	Demanda de calefacción máxima [kWh/(m ² a)]	Demanda de refrigeración + deshumidificación máxima [kWh/(m ² a)]
Polar	35	igual al requerimiento para Casa Pasiva
Frío	30	
Frío - templado	25	
Cálido - templado	20	
Cálido	15	
Caluroso	-	
Muy caluroso	-	

Tabla 15 - Certificación en base al requisito de demanda de calefacción. Fuente: (Passivhaus Institut 2016)

Zona climática de acuerdo al PHPP	Envolvente opaca ¹ respecto al...				Ventanas (incluyendo puertas exteriores)				Ventilación					
	...terreno		...aire exterior		En conjunto ⁴		Acrystalamiento ⁵							
	Aislamiento	Aislam. exterior	Aislam. interior ²	Pintura exterior ³	Coeficiente de transmitancia térmica máxima (valor-U) máximo (valor-U)	Cool colours	Coeficiente de transmitancia térmica máxima (U _{P/V, instalada})	Coeficiente de ganancias solares (valor-g)	Carga solar específica máxima durante el periodo de refrigeración	Indice recuper. de calor mínimo ⁷	Indice recuper. de humedad mínimo ⁸			
	Coeficiente de transmitancia térmica máxima (valor-U)													
	[W/(m ² K)]		-		[W/(m ² K)]		-		[kWh/m ² a]	%				
Polar	0,09	0,25	-		0,45	0,50	0,60	Ug - g*0,7 ≤ 0	100	80%	-			
Frio	0,12	0,30	-		0,65	0,70	0,80	Ug - g*1,0 ≤ 0		80%	-			
Frío - templado	0,15	0,35	-		0,85	1,00	1,10	Ug - g*1,6 ≤ 0		75%	-			
Cálido - templado	0,30	0,50	-		1,05	1,10	1,20	Ug - g*2,8 ≤ -1		75%	-			
Cálido	0,50	0,75	-		1,25	1,30	1,40	-		-	-			
Caluroso	0,50	0,75	sí		1,25	1,30	1,40	-		-	60 % (climas húmedos)			
Muy caluroso	0,25	0,45	sí		1,05	1,10	1,20	-		-	60 % (climas húmedos)			

Tabla 16 - Certificación EnerPHit en base a los requisitos de componentes individuales del edificio. Fuente: (Passivhaus Institut 2016)

Además, para cumplir la certificación EnerPHit hay dos criterios adicionales que debe cumplirse: la hermeticidad igual o inferior a 1 y un límite en la demanda de energía primaria no renovable que se establece de acuerdo con las funciones matemáticas que pueden visualizarse en la Tabla 16. Este límite es calculado de forma automática por la herramienta PHPP 9 una vez se introducen todos los datos de la edificación.

Hermeticidad	Criterios ¹			Criterios alternativos ²	
	Resultado ensayo de presión n ₅₀ [1/h]	≤	1,0		
Energía primaria renovable (PER)³					
Demanda PER ⁴ [kWh/(m ² a)]		≤	60 + (Q _H - Q _{H,PH}) + f _{OPER,H} + (Q _C - Q _{C,PH}) * 1/2	Plus	Premium
Generación de energía renovable (con referencia la huella proyectada del edificio) ⁵ [kWh/(m ² a)]		≥	-	60	120
			±15 kWh/(m ² a) desviación respecto a los criterios...		
			...con compensación de la desviación mostrada arriba mediante diferentes valores de generación		

Tabla 17 - Criterios generales EnerPHit (siempre aplicables, independientemente del método elegido). Fuente: (Passivhaus Institut 2016)

Ya que sospechamos en la Casa experimental en Muuratsalo tiene altas posibilidades de ser certificada como EnerPHit, se decidió volver a la herramienta PHPP 9 para intentar conseguir esta certificación.

6.4.1 CERTIFICANDO LA CASA EXPERIMENTAL EN MUURATSALO BAJO EL ESTÁNDAR ENERPHIT.

En primer lugar, para realizar esta certificación, se modificó el tipo de certificación deseada en la hoja de cálculo comprobación de la herramienta PHPP 9 que anteriormente se había utilizado para intentar certificar la Casa Experimental en Muuratsalo bajo el estándar Passivhaus, este hoja de Excel (ver Figura 42) ya poseía todos los datos de la edificación, por tanto, fue un punto de partida válido para intentar certificarla como EnerPHit.

Al seleccionar el nuevo estándar, la hoja comprobación se adaptó automáticamente a los nuevos criterios requeridos por EnerPHit, como puede visualizarse en la Figura 65.

Pero como podemos ver en el apartado “EnerPHit (modernización): Características de los componentes” de la Hoja Comprobación de la Figura 65, tenemos dos puntos que no se están cumpliendo en específico:

- Ventanas/Puertas de entrada (UV/P,instalada) en 0,86 W/(m²K), cuando el límite máximo es de 0,67 W/(m²K).
- Acristalamiento (valor-g) en 0,63 cuando el mínimo establecidos es de 0,69.

Esto nos dice que debemos intentar reducir la transmitancia térmica de nuestras ventanas y aumentar su coeficiente de ganancias solares. Para ello, siendo consciente de la necesidad encontrar componentes de ventanas certificados por el Passivhaus Institut que tuvieran un excelente desempeño, se realizó una búsqueda en la web <https://database.passivehouse.com/es/components/> que contiene una base de datos

EnerPHit Comprobación



Arquitectura: Alvar Aalto Arquitectura

Calle:

CP / Ciudad: 63100 Kuortane

Provincia/País: Ostrobotnia del Sur FI-Finlandia

Consult. energética: Consultora INO

Calle:

CP / Ciudad: 15000

Provincia/País: A Coruña ES-España

Año construcción: 1952

Nr. de viviendas

1

Nr. de personas: 2,0

Edificio: Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia.

Calle:

CP / Ciudad: 40950 Muuratsalo

Provincia/País: Jyväskylä

FI-Finlandia

Tipo de edificio: Vivienda

Datos climáticos: ud---00-FI0003a-Muuratsalo

Zona climática: 2: Fria

Altitud de la localización: 88 m

Propietario / cliente: Alvar Aalto

Calle:

CP / Ciudad: 63100 Kuortane

Provincia/País: Ostrobotnia del Sur

FI-Finlandia

Ingeniería: Alvar Aalto Ingenieria

Calle:

CP / Ciudad: 63100 Kuortane

Provincia/País: Ostrobotnia del Sur

1-Edificio residencial

Certificación: Passive House Institute

Calle: Rheinstr. 44/47

CP / Ciudad: Darmstadt

Provincia/País: Ostrobotnia del Sur

Temp. interior invierno [°C]: 20,0

Temp. interior verano [°C]: 25,0

Ganancias internas de calor (GIC); caso calefacción [W/m²]: 2,5

GIC caso refrig. [W/m²]: 3,0

Capacidad específica [Wh/K por m² de SRE]: 60

Refrigeración mecánica:

Valores específicos del edificio con referencia a la superficie de referencia energética

	Superficie de referencia energética m²	139,6	Criterios alternativos	¿Cumplido?²
Calefacción	Demanda de calefacción kWh/(m²a)	73	≤ - -	-
	Carga de calefacción W/m²	25	≤ - -	-
Refrigeración	Demanda refrigeración & deshum. kWh/(m²a)	-	≤ - -	-
	Carga de refrigeración W/m²	-	≤ - -	-
	Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C) %	0	≤ 10	Sí
	Frecuencia excesivamente alta humedad (> 12 g/kg) %	0	≤ 20	Sí
Hermeticidad	Resultado ensayo presión n ₅₀ 1/h	0,6	≤ 1,0	Sí
Energía Primaria no renovable (EP)	Demanda EP kWh/(m²a)	117	≤ 190	Sí
Energía Primaria Renovable (PER)	Demanda PER kWh/(m²a)	285	≤ - -	-
	Generación de Energía Renovable (en relación con área de la huella del edificio proyectado) kWh/(m²a)	0	≥ - -	-

EnerPHit (modernización): Características de los componentes

Envolvente térmica en contacto con el aire exterior¹ (Valor-U)	W/(m²K)	0,10	≤ 0,12	Sí
Envolvente térmica en contacto con el terreno¹ (Valor-U)	W/(m²K)	0,09	≤ 0,16	Sí
Muro con aisl. interior en contacto con el aire exterior (Valor-U)	W/(m²K)	-	≤ 0,3	-
Muro con aisl. interior en contacto con el terreno (Valor-U)	W/(m²K)	-	≤ 0,29	-
Cubierta plana (IRS)	-	72	IV -	-
Superficie externa inclinada y vertical (IRS)	-	72	IV -	-
Ventanas/Puertas de entrada (U _{V/P,instalada})	W/(m²K)	0,86	≤ 0,67	No
Ventanas (U _{V,instalada})	W/(m²K)	-	≤ 0,72	-
Ventanas (U _{V,instalada})	W/(m²K)	-	≤ 0,82	-
Acristalamiento (valor-g)	-	0,63	≥ 0,69	No
Acristalamiento/protección solar (carga solar máxima)	kWh/(m²a)	206	≤ -	-
Ventilación (Eficiencia efectiva del recuperador de calor)	%	85	≥ 80	Sí
Ventilación (eficiencia de recuperación de humedad)	%	0	≥ -	-

¹ Sin ventanas, puertas y paredes exteriores con aislamiento por el interior

² Celda vacía: Falta dato; '1': Sin requerimiento

Confirmo que los valores aquí presentados han sido determinados siguiendo la metodología de PHPP y están basados en los valores característicos del edificio. Los cálculos de PHPP están adjuntos a esta comprobación.

¿EnerPHit Classic?

No

Firma:

Función:

1-Diseñador

Ildefonso

Nombre:

Nóvoa Olmedo

Apellido:

Emisión:

Ciudad:

A Coruña

Figura 65 - Hoja Comprobación con los resultados iniciales después de haber modificados los criterios de certificación del estándar EnerPHit. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basada la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

completa de todos los componentes certificados por este instituto, centrando la búsqueda en los componentes diseñados para climas extremadamente fríos o árticos. Esta búsqueda permitió identificar dos componentes altamente eficientes:

- ACRISTALAMIENTO: 0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)
- MARCO: 1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G

Luego se procedió a importar las propiedades del componente “ENERsign GmbH” en la hoja componente del PHPP 9, ya que a diferencia del acristalamiento “AGC - iplus Top”, no se encontraba en la base de datos interna del de hoja de cálculo del PHPP 9. Esto es normal que ocurra ya que el Passivhaus Institut continuamente incorpora nuevos componentes certificados a su base de datos, por lo cual, no todos están incorporados a la última versión de PHPP.

Una vez importados los datos se procedió a surtir todos los acristalamientos y marcos por los nuevos componentes certificados que fueron seleccionados, como se puede ver en la Figura 66. Este cambio fue suficiente para cumplir con el EnerPHit como se puede ver en la Figura 67.

Instalado en	Acrystalamiento	Marco	Valor g	Valor-U		Ψ Borde de vidrio
Selección a partir de hoja 'Superficies'	Selección a partir de hoja 'Componentes'	Selección a partir de hoja 'Componentes'	Radiación perpendicular	Acrystalamiento	Marco (pro- medio)	Ψ Borte de vidrio (Prom.)
	1-Ordenar: COMO LISTA	1-Ordenar: COMO LISTA	-	W/(m ² K)	W/(m ² K)	W/(mK)
12-EDU_Pared_012_W	0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G	0,53	0,49	0,44	0,016
27-EDU_Pared_027_S	0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G	0,53	0,49	0,45	0,016
10-EDU_Pared_010_E	0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G	0,53	0,49	0,45	0,016
29-EDU_Pared_029_N	0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G	0,53	0,49	0,45	0,016
28-EDU_Pared_028_W	0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G	0,53	0,49	0,45	0,016
29-EDU_Pared_029_N	0676gI03-AGC - iplus Top 1.1T (4:/12/4/12:/4 Kr 90%)	1428wc01-ENERsign GmbH - ENERsign arctis - MULTITECH G	0,53	0,49	0,45	0,016

Figura 66 - Hoja Ventanas. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Sustitución de acristalamientos de marcos de alto rendimiento certificados por el Passivhaus Institut. Fuente: Elaboración Propia. Basado en el Programa PHPP 9 del Passivhaus Institut.

EnerPHit Comprobación



Arquitectura: Alvar Aalto Arquitectura

Calle: CP / Ciudad: 63100 Kuortane Provincia/País: Ostrobotnia del Sur FI-Finlandia

Consult. energética: Consultora INO

Calle: CP / Ciudad: 15000 Provincia/País: A Coruña ES-España

Año construcción: 1952

Nr. de viviendas: 1

Nr. de personas: 2,0

Edificio:	Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia.		
Calle:	CP / Ciudad:	40950 Muuratsalo	FI-Finlandia
Provincia/País:	Jyväskylä	FI-Finlandia	
Tipo de edificio:	Vivienda		
Datos climáticos:	ud--00-FI0003a-Muuratsalo		
Zona climática:	2: Fría	Altitud de la localización:	88 m
Propietario / cliente:	Alvar Aalto		
Calle:	CP / Ciudad:	63100 Kuortane	FI-Finlandia
Provincia/País:	Ostrobothnia del Sur	FI-Finlandia	
Ingeniería:	Alvar Aalto Ingeniería		
Calle:	CP / Ciudad:	63100 Kuortane	
Provincia/País:	Ostrobothnia del Sur	1-Edificio residencial	
Certificación:	Passive House Institute		
Calle:	Rheinstr. 44/47		
CP / Ciudad:	Darmstadt		
Provincia/País:	Ostrobothnia del Sur		
Temp. interior invierno [°C]:	20,0	Temp. interior verano [°C]:	25,0
Ganancias internas de calor (GIC); caso calefacción [W/m²]:	2,5	GIC caso refreg. [W/m²]:	3,0
Capacidad específica [Wh/K por m² de SRE]:	60	Refrigeración mecánica:	

Valores específicos del edificio con referencia a la superficie de referencia energética

	Superficie de referencia energética m²	139,6	Criterios alternativos		¿Cumplido?²
			Criterio	-	
Calefacción	Demanda de calefacción kWh/(m²a)	70	≤	-	-
	Carga de calefacción W/m²	23	≤	-	-
Refrigeración	Demanda refrigeración & deshum. kWh/(m²a)	-	≤	-	-
	Carga de refrigeración W/m²	-	≤	-	-
	Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C) %	0	≤	10	Sí
	Frecuencia excesivamente alta humedad (> 12 g/kg) %	0	≤	20	Sí
Hermeticidad	Resultado ensayo presión n ₅₀ 1/h	0,6	≤	1,0	Sí
Energía Primaria no renovable (EP)	Demanda EP kWh/(m²a)	115	≤	186	Sí
Energía Primaria Renovable (PER)	Demanda PER kWh/(m²a)	278	≤	-	-
	Generación de Energía Renovable (en relación con área de la huella del edificio proyectado) kWh/(m²a)	0	≥	-	-

EnerPHit (modernización): Características de los componentes

Envolvente térmica en contacto con el aire exterior¹ (Valor-U)	W/(m²K)	0,10	≤	0,12	Si
Envolvente térmica en contacto con el terreno¹ (Valor-U)	W/(m²K)	0,09	≤	0,15	Si
Muro con aisl. interior en contacto con el aire exterior (Valor-U)	W/(m²K)	-	≤	0,3	-
Muro con aisl. interior en contacto con el terreno (Valor-U)	W/(m²K)	-	≤	0,29	-
Cubierta plana (IRS)	-	72	≥	-	-
Superficie externa inclinada y vertical (IRS)	-	72	≥	-	-
Ventanas/Puertas de entrada (U _{V,P} instalada)	W/(m²K)	0,66	≤	0,67	Si
Ventanas (U _V instalada)	W/(m²K)	-	≤	0,72	-
Ventanas (U _V instalada)	W/(m²K)	-	≤	0,82	-
Acristalamiento (valor-g)	-	0,53	≥	0,49	Si
Acristalamiento/protección solar (carga solar máxima)	kWh/(m²a)	173	≤	-	-
Ventilación (Eficiencia efectiva del recuperador de calor)	%	85	≥	80	Si
Ventilación (eficiencia de recuperación de humedad)	%	0	≥	-	-

¹ Sin ventanas, puertas y paredes exteriores con aislamiento por el interior

² Celda vacía: Falta dato; -: Sin requerimiento

Confirmo que los valores aquí presentados han sido determinados siguiendo la metodología de PHPP y están basados en los valores característicos del edificio. Los cálculos de PHPP están adjuntos a esta comprobación.

Función:

1-Diseñador

Ildefonso

Nombre:

Nóvoa Olmedo

Apellido:

¿EnerPHit Classic?

Si

Firma:

Emisión:

Ciudad:

A Coruña

Figura 67 - Hoja Comprobación estándar EnerPHit con los resultados finales después de haber actualizado marcos y acristalamientos de ventanas. Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia. Fuente: Elaboración Propia. Basada la herramienta PHPP 9 del Passivhaus Institut.

7. CONCLUSIONES.

Después de realizar este trabajo práctico se puede concluir que el estándar Passivhaus puede ser implementado de forma exitosa en viviendas antiguas, consiguiendo una considerable reducción en su demanda de calefacción, reduciéndose hasta en un 90%. Esto es posible gracias a la mejora sustancial de la capacidad aislante de la envolvente y al control automatizado de la ventilación de la vivienda por medio de un recuperador de calor.

También se pudo observar una disminución muy significativa en la demanda de energía primaria no renovable gracias al uso de bombas de calor geotérmica en ambas viviendas, aunque su rendimiento fue muy distinto en cada emplazamiento.

En el primer emplazamiento de Finlandia, dadas las bajas temperaturas del entorno, el calor proveniente de este sistema de bomba de calor geotérmica no fue suficiente para cubrir la demanda de calefacción, por lo que se calculó un sistema de apoyo adicional, una caldera de biomasa, que cubre un 70% del requerimiento de calefacción y un 100% del requerido de agua caliente sanitaria. Hay que tener en cuenta que la temperatura de salida de la bomba de calor después de pasar salmuera por el suelo era tan solo de 5,2 grados centígrados, a pasar de parecer poco, representa unos 28,9 grados centígrados más que la temperatura más baja registrada en el infierno finlandés de unos -23,70 grados centígrados (ver Tabla 3), esto ya reduce en gran medida el trabajo de la caldera, que solo tendrá que aumentar la temperatura 14,8 grados centígrados más para alcanzar la temperatura de confort establecidas para el invierno de 20 grados centígrados. Este sistema dual, reduce el consumo de pellets y a la vez permite aprovechar el calor del subsuelo en climas muy fríos donde la temperatura que la bomba de calor puede aportar, no es suficiente para alcanzar la temperatura de confort establecida.

En el segundo caso, en el emplazamiento de París, la bomba de calor fue suficiente para cubrir la demanda de calefacción de la vivienda, que, a pesar de ser una vivienda de mayor tamaño, (479,59 m²) en comparación a la Casa experimental en Muuratsalo, está presenta una mejor relación de compacidad, como podemos ver en la Tabla 14, esto permitió lograr certificar esta vivienda como Passivhaus, ya que cumplió con una carga de calefacción inferior a 10 W/m². En contraste, si verificamos los resultados obtenidos de la casa experimental en Muuratsalo, nos daremos cuenta de que, a pesar de haber conseguido reducir su demanda de energía primaria no renovable, y de cumplir en este punto el Estándar Passivhaus, veremos qué en el caso de la demanda de calefacción, este punto no alcanzó los estándares requeridos, que limita el consumo a un máximo de 15 kWh/m²a.

Aunque se intentó aumentar el aislamiento térmico de la Casa experimental en Muuratsalo, más centímetros de aislante no se tradujo en una disminución significativa de la demanda de calefacción. Este resultado expuso problemas importantes de esta vivienda, por un lado, su mala relación de compacidad, que expone una gran superficie envolvente al inclemente invierno finlandés y por el otro su ubicación, que nos condena a lidiar con temperaturas muy bajas durante la mayor parte del año.

En este aspecto, la Maison Louis Carré resalta por la facilidad con la que pudo ser certificada solo mejorando un poco su aislamiento, instalando un intercambiador de calor y una bomba de calor geotérmica, que por supuesto, en un clima menos extremo como el parisino, logra de forma elegante resolver la demanda de calefacción de la vivienda.

Pero esto no quiere decir que Aalto haya diseñado muy bien la Maison Louis Carré y muy mal su Casa experimental en Muuratsalo. Al contrario, las dos viviendas son excelentes obras de la arquitectura moderna, solo que hay que entender que el uso de cada vivienda era completamente distinto.

La Maison Louis Carré fue pensada como una residencia fija para Louis Carré y su familia, por lo cual estaría habitada todo el año, mientras que la Casa experimental en Muuratsalo era una casa de verano, donde Aalto y su esposa Elissa iban a veranear durante un par de meses. Por lo cual esta vivienda, teniendo en cuenta su uso, es tan eficiente como la Maison Louis Carré, solo que durante un periodo del año, que era lo que realmente le importaba a Aalto. Y aunque la Casa Experimental en Muuratsalo no pudo ser certificada como Passivhaus, si logró obtener el certificado EnerPHit gracias a la utilización de componentes certificados por el Passivhaus Institut especiales para viviendas en climas árticos.

Una reflexión adicional sobre la Casa Experimental en Muuratsalo: si consideramos su emplazamiento, en el interior y bastante al norte de Finlandia, es un lugar donde uno no pensaría encontrar una casa de verano ya que por ejemplo la capital de Finlandia, Helsinki, se encuentra mucho más al sur en la costa finlandesa, y por tanto se podría pensar que sería este un mejor lugar para construir una casa de verano, pero no estamos teniendo en cuenta dos factores importantes: el efecto de la continentalidad y las bajas temperaturas que se dan en el Mar Báltico durante casi todo el año. Esto produce un efecto similar al que podemos ver en los países mediterráneos donde las temperaturas más altas en verano se dan en el interior del territorio, lejos de la costa, pero a diferencia del Mediterráneo la temperatura más alta que se puede registrar en el interior de Finlandia en verano es de 26,63 grados centígrados (ver Tabla 2) que se da en el mes de Julio, mientras que los territorios de la costa que encuentran a temperaturas las bajas por el efecto de las bajas temperaturas del Mar Báltico.

Esto hace que paradójicamente el norte de Finlandia en verano sea más cálido que el sur si nos encontramos lejos de la costa, es un poco anti intuitivo, pero fue muy interesante percarnos de este fenómeno, que claramente es un efecto positivo de la continentalidad del interior de Finlandia, que le otorga a esta zona del país de unos veranos con temperaturas muy agradables. Por lo cual, bajo ese punto de vista, Aalto

eligió muy bien el emplazamiento de su casa de verano, teniendo en cuenta las opciones que tenía en Finlandia. Claro ya en invierno la cosa cambia mucho, pero eso ya es otra historia.

Pero lo que es realmente relevante de este trabajo de investigación es que ha venido a demostrar que con la implementación del Estándar Passivhaus en ambas viviendas se ha logrado reducir en más de un 90% la demanda de energía primaria no renovable de estas, a pesar de que en algunos casos la demanda de calefacción inferior a 15 kWh/m²a no se logró conseguir, como nos ocurrió en el caso de la Casa Experimental de Muuratsalo, lo realmente importante es la reducción la demanda de energía primaria no renovable y eso en los dos casos, claramente, se ha logrado. Lo que demuestra que la tecnología y la metodología del Estándar Passivhaus funciona. Además, el simple hecho de no lograr certificar la Casa Experimental de Muuratsalo como Passivhaus, sino como EnerPHit, demuestra que los métodos de cálculo del Estándar Passivhaus son rigurosos y no permiten falsear los resultados.

Por lo cual, si tenemos en cuenta los resultados obtenidos en la reducción del consumo de energía primaria no renovable de cada vivienda rehabilitada, que en el caso de la Casa experimental de Muuratsalo es fue del 95,17% y en el caso de la Maison Louis Carré fue del 94,62%, imaginemos el efecto que tendría esta tecnología implementada de forma masiva en todo el parque inmobiliario europeo, creo que conseguiría reducir, o hasta eliminar, la dependencia actual de energía proveniente del extranjero, como es el caso del gas ruso o el petróleo de medio oriente, con las positivas consecuencias económicas y políticas que traería esa independencia. Por lo cual considero que la Unión Europea debe seguir incentivando en el sector de la construcción la aplicación del Estándar Passivhaus, por medio de ayudas, excepciones fiscales o cualquiera mecanismo que impulsen la actualización del parque inmobiliario europeo, transformándolo así en el más eficiente a nivel energético del planeta.

8. LIMITANTES

La investigación tuvo como limitación principal la falta de información certera de cómo fue construida cada edificación, por lo cual se tuvieron que hacer muchas estimaciones de los materiales que fueron utilizados y de sus espesores, también hubo que estimar la conductividad térmica de cada material, por lo cual, puede haber una pequeña diferencia en la demanda energética real de cada vivienda. Pero al usar la misma metodología con cada una, podemos estar seguros de que los resultados, de ser levemente distintos, guardarán la misma proporcionalidad comparativa entre ambas viviendas. Por lo cual las conclusiones comparativas deberían ser las mismas.

Lo mismo ocurre con el caso de la bomba de calor geotérmica de cada vivienda, a falta de unos estudios de suelos reales se hicieron estimaciones. Por tanto, hay que tener en cuenta esta limitante a la hora de leer los resultados.

En todos los libros disponibles sobre la obra de Alvar Aalto, se destaca de forma reiterada la estética y el excelente manejo de la espacialidad que Aalto consiguió en sus obras, pero en ningún momento presentaban ningún tipo de dato con respecto al rendimiento energético de sus viviendas.

Esto es una pena porque creo que sería un punto muy importante a estudiar en su arquitectura, ya que se ven claros indicios, de que sus viviendas, fueron diseñadas pensando también en el clima de la zona donde eran implantadas.

Ahora, cuando la buena arquitectura no solo debe ser belleza, sino también sostenible, es probable que próximamente se empiecen a publicar libros de arquitectura que no solo hablen de la espacialidad de estas edificaciones icónicas, sino también de su comportamiento a nivel energético.

9. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

En el futuro se podría extender esta investigación analizando otras obras del arquitecto Alvar Aalto, ya que dispone de decenas de viviendas que, al analizarlas, podrían aportarnos más datos de interés sobre la sostenibilidad, a nivel energético, de sus obras.

Además, se podría realizar investigaciones similares que estudien las obras de otros arquitectos destacados del movimiento moderno, como Le Corbusier, Mies van der Rohe o Walter Gropius y generar una puntuación que determine que arquitecto logra un mayor puntaje en la sostenibilidad de sus obras.

También se podría centrar la investigación en los materiales de construcción que se utilizaron en la época, punto que en este trabajo de investigación fue imposible de abordar dada la escasa información obtenida al respecto. Quizás esta es la investigación más difícil de realizar, ya que requeriría desplazarse al lugar de la obra para hacer un estudio real de los materiales utilizados en su envolvente, y de la transmitancia térmica de los mismos.

Otra línea de investigación muy interesante sería la de poner a prueba el Estándar Passivhaus en edificaciones ubicadas en zonas climáticas más cálidas, ya que, dada la ubicación de las edificaciones estudiadas en este trabajo de investigación, que se encuentran en zonas climáticas predominantemente frías, no se pudo estudiar el comportamiento de estas edificaciones en condiciones de sobrecalentamiento, por lo cual la parte del Estándar Passivhaus dedicada a refrigeración, no se pudo poner a prueba.

10. BIBLIOGRAFÍA.

- CORNER, D.B., FILLINGER, J.C. y KWOK, A.G., 2017. *Passive House Details: Solutions for High-Performance Design* [en línea]. S.I.: Taylor & Francis. ISBN 9781317339649. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=q0lwDwAAQBAJ>.
- FEIST, W., 2015. *PHPP Programa de Planificación Passivhaus. La Herramienta de cálculo de balance energético y planificación Passivhaus para edificios y modernizaciones eficientes*. Darmstadt: Passive House Institute.
- FERNÁNDEZ-GALIANO, L., 2020. Alvar Aalto. [en línea]. [Consulta: 22 julio 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=hnQ5dLObhBY>.
- HOLMA, M., LUKKARINEN, P. y AALTO, A., 2009. *KOETALO THE EXPERIMENTAL HOUSE MUURATSALO*. 4. S.I.: Alvar Aalto Foundation / Alvar Aalto Museum. ISBN 978-952-5371-54-3.
- JETSONEN, J., JETSONEN, S. y PALLASMAA, J., 2011. *Alvar Aalto Houses*. New York: Princeton Architectural Press. ISBN 978-1-56898-982-2.
- L'INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DES ÉTUDES ÉCONOMIQUES, 2015. Populations légales 2013 – Commune de Bazoches-sur-Guyonne (78050) | Insee. [en línea]. [Consulta: 31 julio 2020]. Disponible en: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2119504?geo=COM-78050#documentation-sommaire>.
- LAHTI, L., 2009. *Alvar Aalto: 1898-1976 : paraíso para gente modesta* [en línea]. S.I.: Taschen. Basic Art Series 2.0. ISBN 9783836512923. Disponible en: https://books.google.es/books?id=iO_QQgAACAAJ.
- LAWRIE, LINDA, K. y DRURY, B., 2019. *climate.onebuilding.org. Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)* [en línea]. [Consulta: 31 julio 2020]. Disponible en: <http://climate.onebuilding.org/>.
- PASSIVHAUS INSTITUT, 2016. Criterios para los Estándares Casa Pasiva, EnerPHit y PHI Edificio de baja demanda energética. *Passipedia - The Passive House Resource* [en línea]. Darmstadt: [Consulta: 20 septiembre 2020]. Disponible en: https://www.passipedia.org/certification/certified_passive_houses/certification_criteria_in_other_languages.
- SCHUCK, J., 2007. *Passivhäuser: bewährte Konzepte und Konstruktionen* [en línea]. S.I.: Kohlhammer. ISBN 9783170180550. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=AaxBJahbokkC>.

ZELGER, T., FIGL, H. y SCHARNHORST, A., 2016. *Details for Passive Houses: Renovation: A Catalogue of Ecologically Rated Constructions for Renovation* [en línea]. S.l.: Birkhäuser. ISBN 9783035607543. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=Y8bJDQAAQBAJ>.

FUENTES DE IMÁGENES

Imagen	Fuente	Imagen	Fuente	Imagen	Fuente	Imagen	Fuente	Fuente	URL
Figura 1	1	Anexo 1	10	Anexo 22	10	Anexo 43	13	1	https://bit.ly/3hH44RA
Figura 2	2	Anexo 2	9	Anexo 23	10	Anexo 44	13	2	https://bit.ly/2FAeQMw
Figura 3	3	Anexo 3	9	Anexo 24	9	Anexo 45	13	3	https://bit.ly/32BY48r
Figura 4	4	Anexo 4	9	Anexo 25	10	Anexo 46	13	4	https://bit.ly/2Ry6g3h
Figura 5	5	Anexo 5	9	Anexo 26	10	Anexo 47	13	5	https://bit.ly/3iCZBkf
Figura 6	6	Anexo 6	9	Anexo 27	10	Anexo 48	13	6	https://bit.ly/2FB0DPr
Figura 7	7	Anexo 7	10	Anexo 28	10	Anexo 49	13	7	https://bit.ly/2FKTnQA
Figura 8	8	Anexo 8	10	Anexo 29	9	Anexo 50	13	8	https://bit.ly/32Hd4SJ
Figura 9	9	Anexo 9	10	Anexo 30	10	Anexo 51	14	9	https://bit.ly/3iC3bLm
Figura 10	9	Anexo 10	10	Anexo 31	10	Anexo 52	14	10	https://bit.ly/3msrKg1
Figura 11	9	Anexo 11	10	Anexo 32	10	Anexo 53	14	11	https://bit.ly/3hB7mpt
Figura 12	10	Anexo 12	10	Anexo 33	10	Anexo 54	14	12	https://bit.ly/33Dcy79
Figura 13	11	Anexo 13	10	Anexo 34	10	Anexo 55	14	13	https://bit.ly/3ilfc1W
Figura 14	12	Anexo 14	10	Anexo 35	10	Anexo 56	14	14	https://bit.ly/3hAOqY4
Figura 15	13	Anexo 15	10	Anexo 36	10	Anexo 57	14	15	https://bit.ly/3hAoWd5
Figura 16	14	Anexo 16	9	Anexo 37	10	Anexo 58	14	16	https://bit.ly/35HMFpy
Figura 17	15	Anexo 17	9	Anexo 38	9	Anexo 59	14	17	https://bit.ly/3hDrkzR
Figura 21	16	Anexo 18	9	Anexo 39	9	Anexo 60	14	18	https://bit.ly/2ZKnvTm
Figura 43	17	Anexo 19	9	Anexo 40	13	Anexo 61	14		
Figura 46	18	Anexo 20	10	Anexo 41	13	Anexo 62	14		
Figura 47	18	Anexo 21	10	Anexo 42	13				

Tabla 18 – Índice de imágenes extraídas de internet.

FUENTES DE MODELOS 3D

Modelo 3D	URL
Casa de verano experimental, en Muuratsalo, Finlandia.	https://3dwarehouse.sketchup.com/model/07af34ce-2e8f-44fd-ae6f-f438f5d6d5aa/Experimental-House-Alvar-Aalto
Maison Louis Carré, Bazoches sur Guyonne, Francia.	https://3dwarehouse.sketchup.com/model/2c7e6757-b1c3-406d-9651-177734ed6681/Maison-Louis-Carr%C3%A9-Alvar-Aalto

Tabla 19 - Fuentes Modelos 3D de cada vivienda, que se tomaron como base para el cálculo energético.

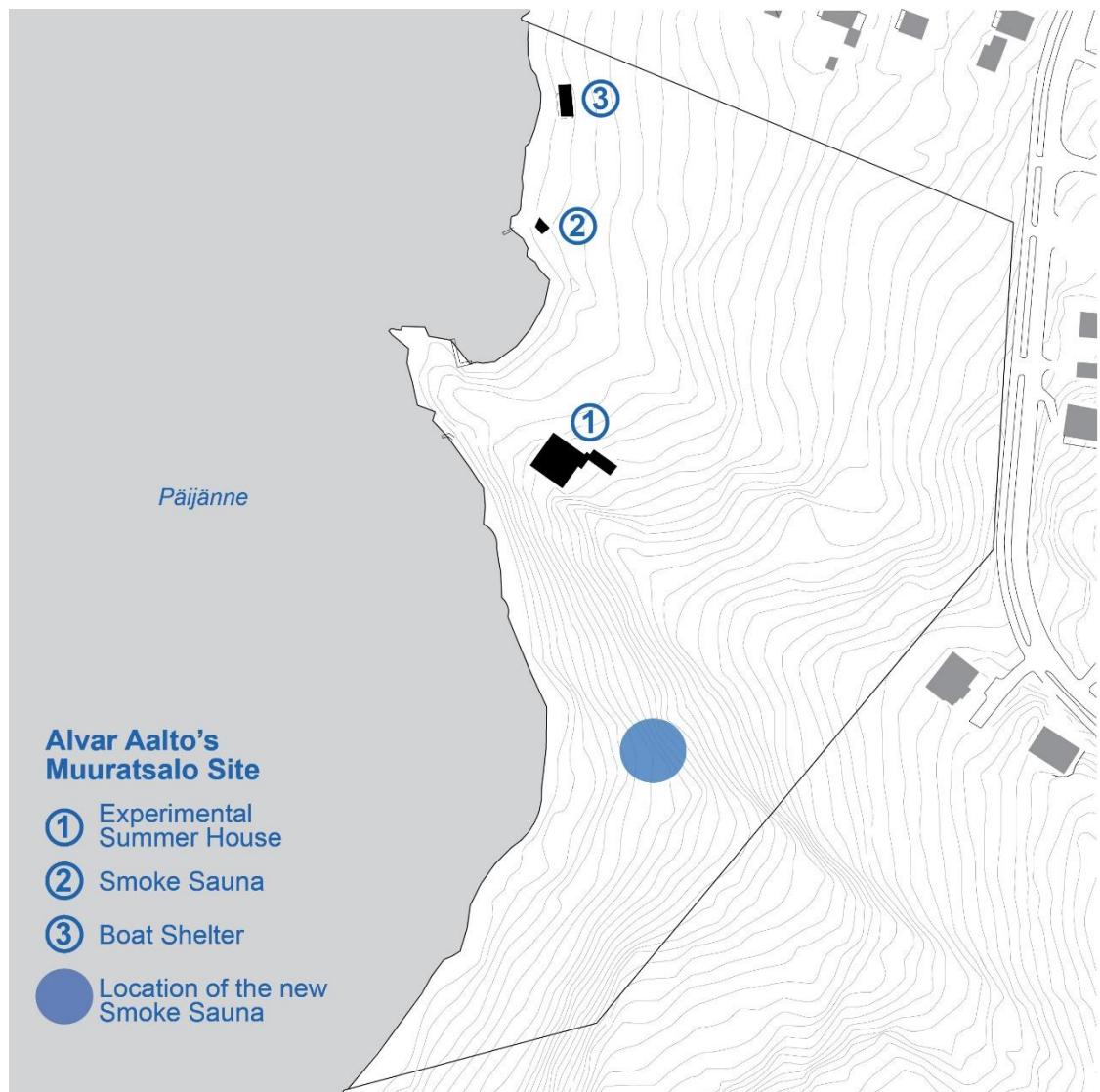
LICENCIAS

Este trabajo de investigación fue realizado, usando los siguientes softwares:

1. **PHPP 9 (Passive House Planning Package)** que incluye el plugin para SketchUp **designPH** pude descargar una versión de prueba en: https://designph.org/DEMO_download , pero en este trabajo de investigación se utilizó una licencia educacional otorgada por el Passivhaus Institut.
2. **Climate Consultant 6.0**, programa de análisis climático de uso gratuito desarrollado por la UCLA (Universidad de California en Los Ángeles), disponible en: <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>
3. **SketchUp Make 2017**, versión gratuita de SketchUp que puede ser descargada directamente de: <https://www.sketchup.com/sketchup/2017/en/sketchupmake-2017-2-2555-90782-en-x64-exe>
4. **Microsoft Office 365**, licencia estudiantil otorgada por la UDC (Universidade da Coruña), descargada desde: <https://www.office.com/>. En concreto se utilizó Microsoft Word y Microsoft Excel para el desarrollo de esta investigación.

Los softwares antes nombrados son propiedad de sus respectivas empresas o instituciones desarrolladoras. Sus nombres son marcas registradas que les pertenecen a cada una de ellas. Solo se ha hecho uso de estos con fines académicos.

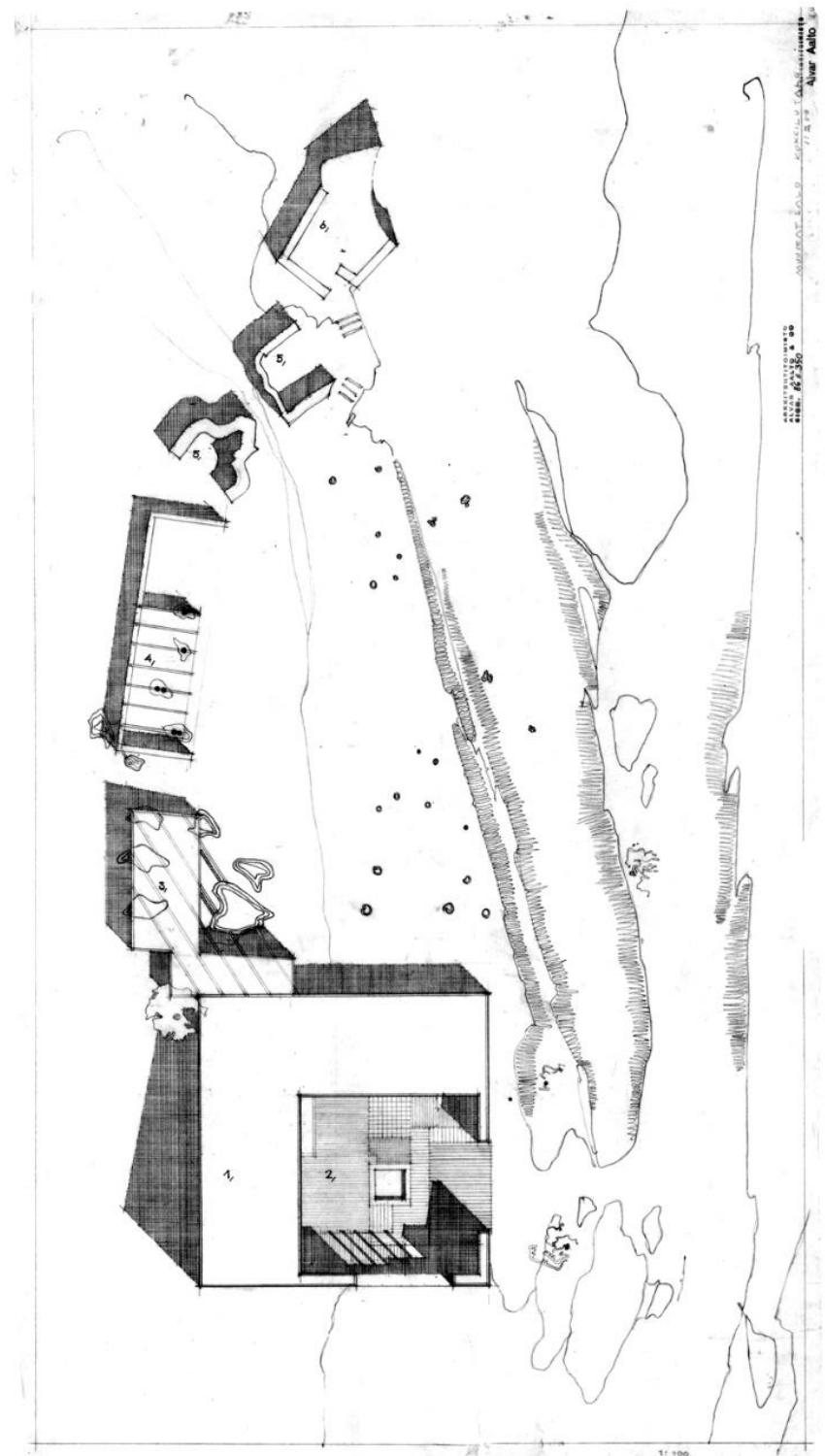
11. ANEXOS.



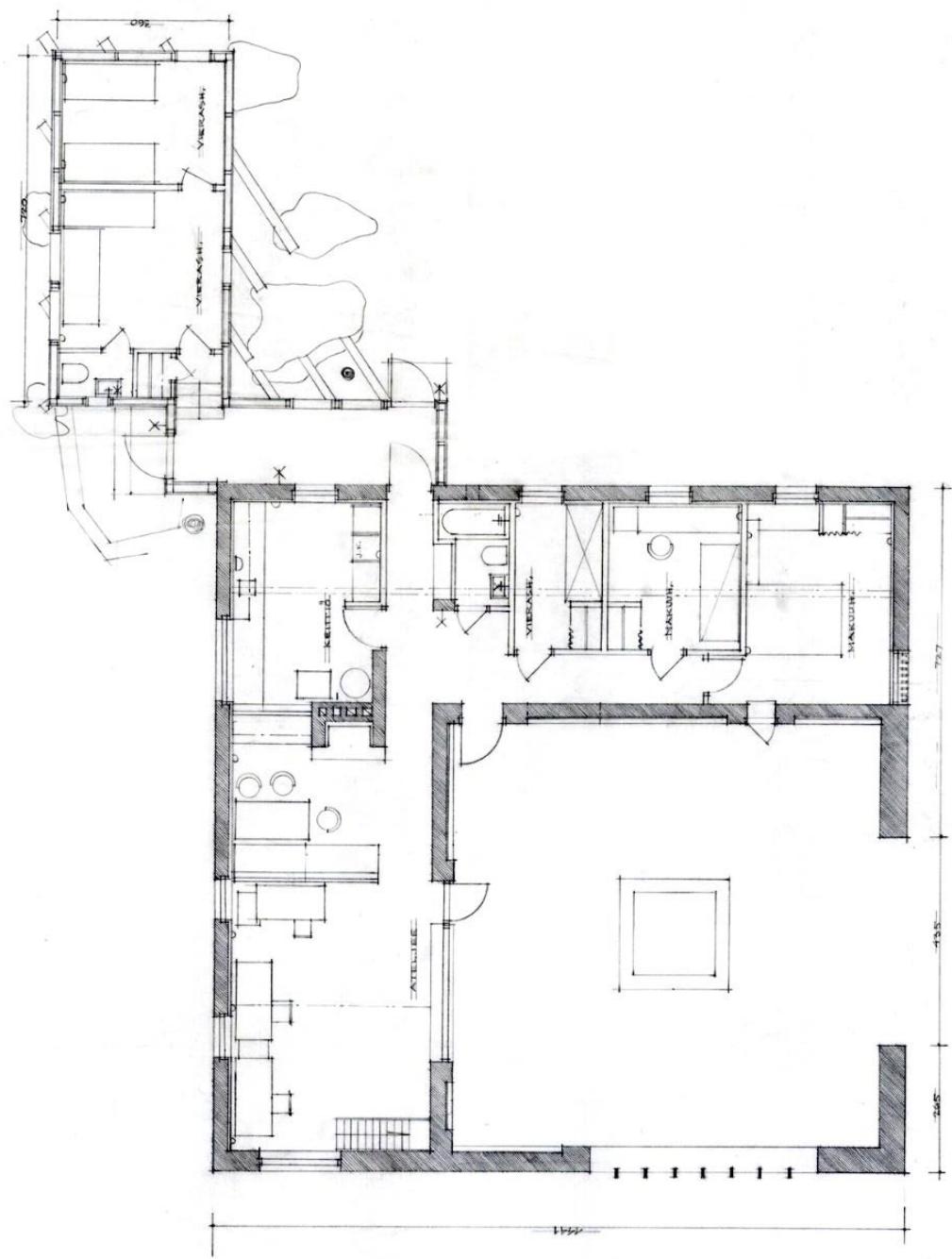
Anexo 1 – Emplazamiento Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



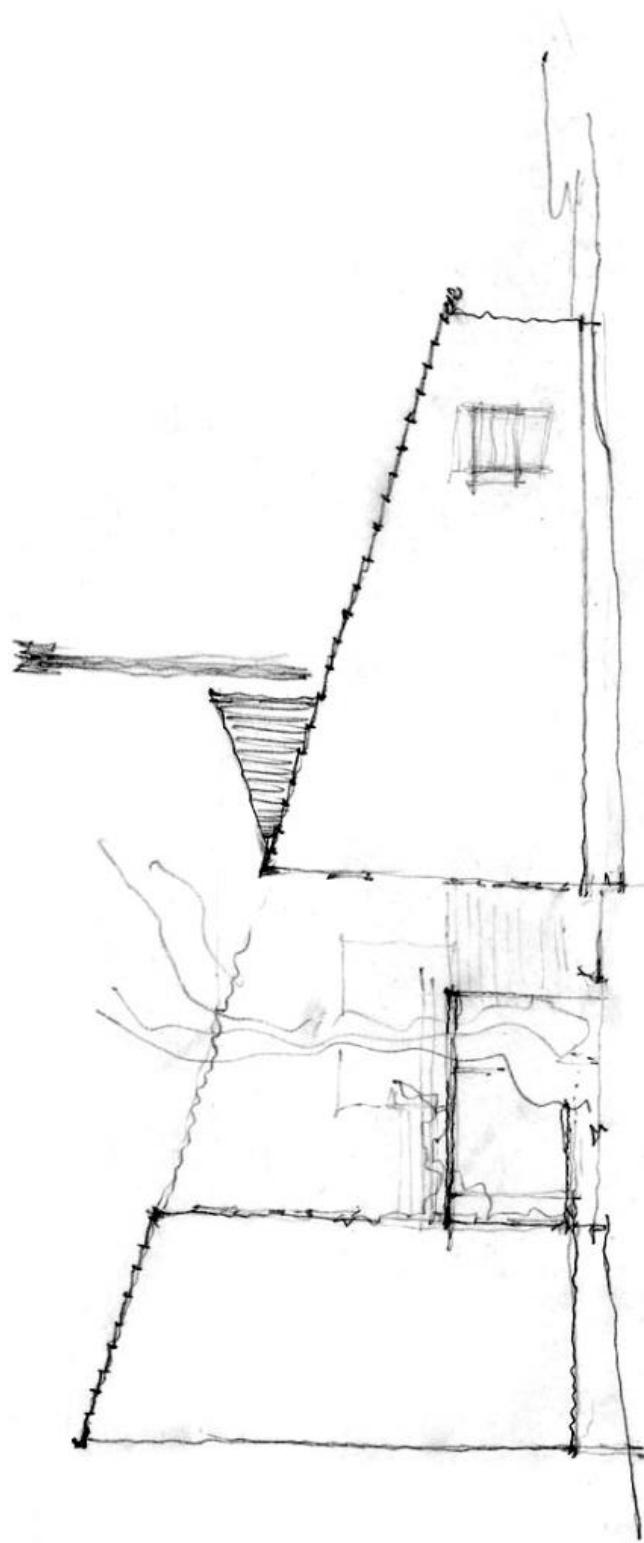
Anexo 2 – Plano Topográfico, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



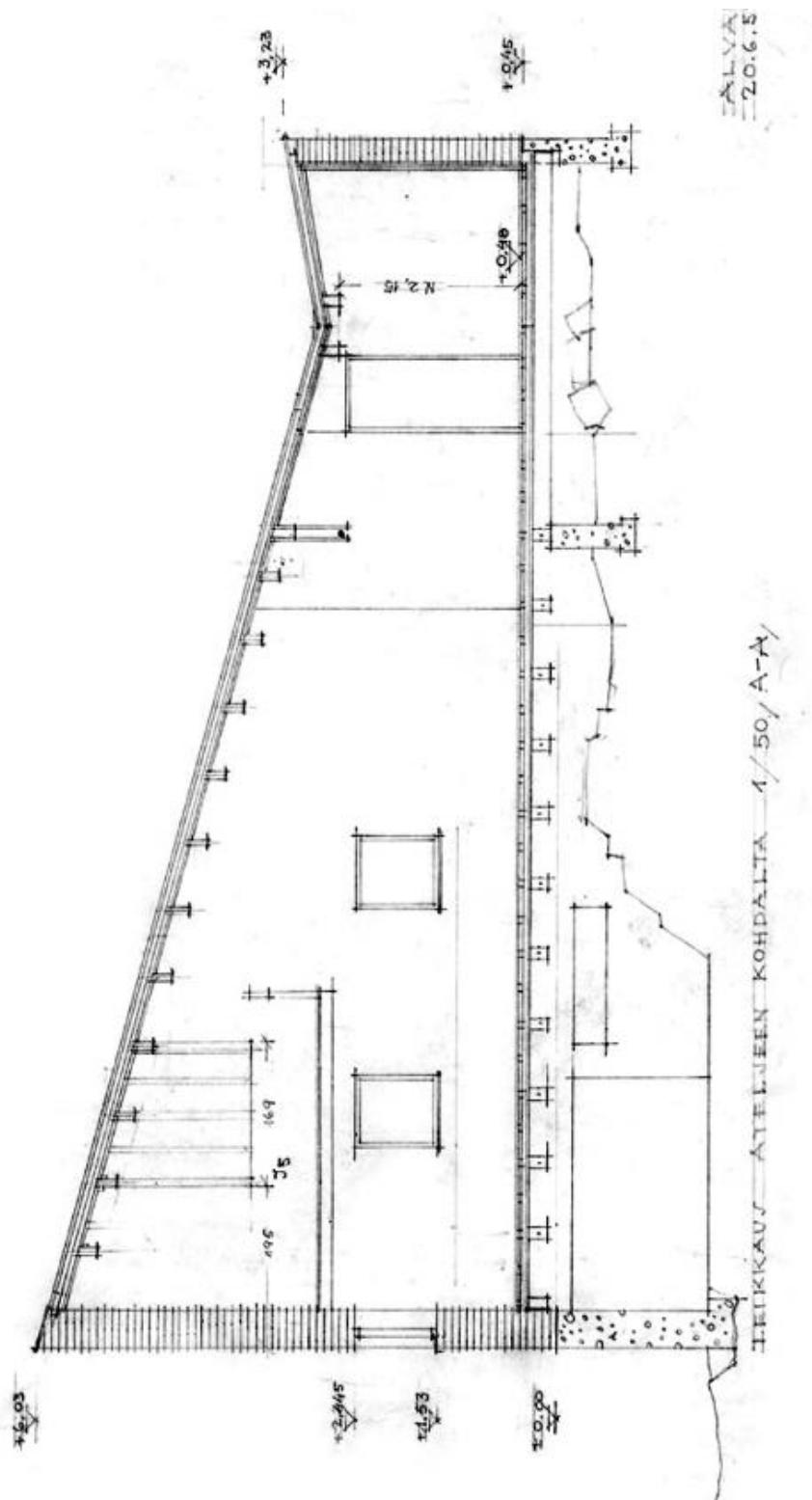
Anexo 3 – Planta techo, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



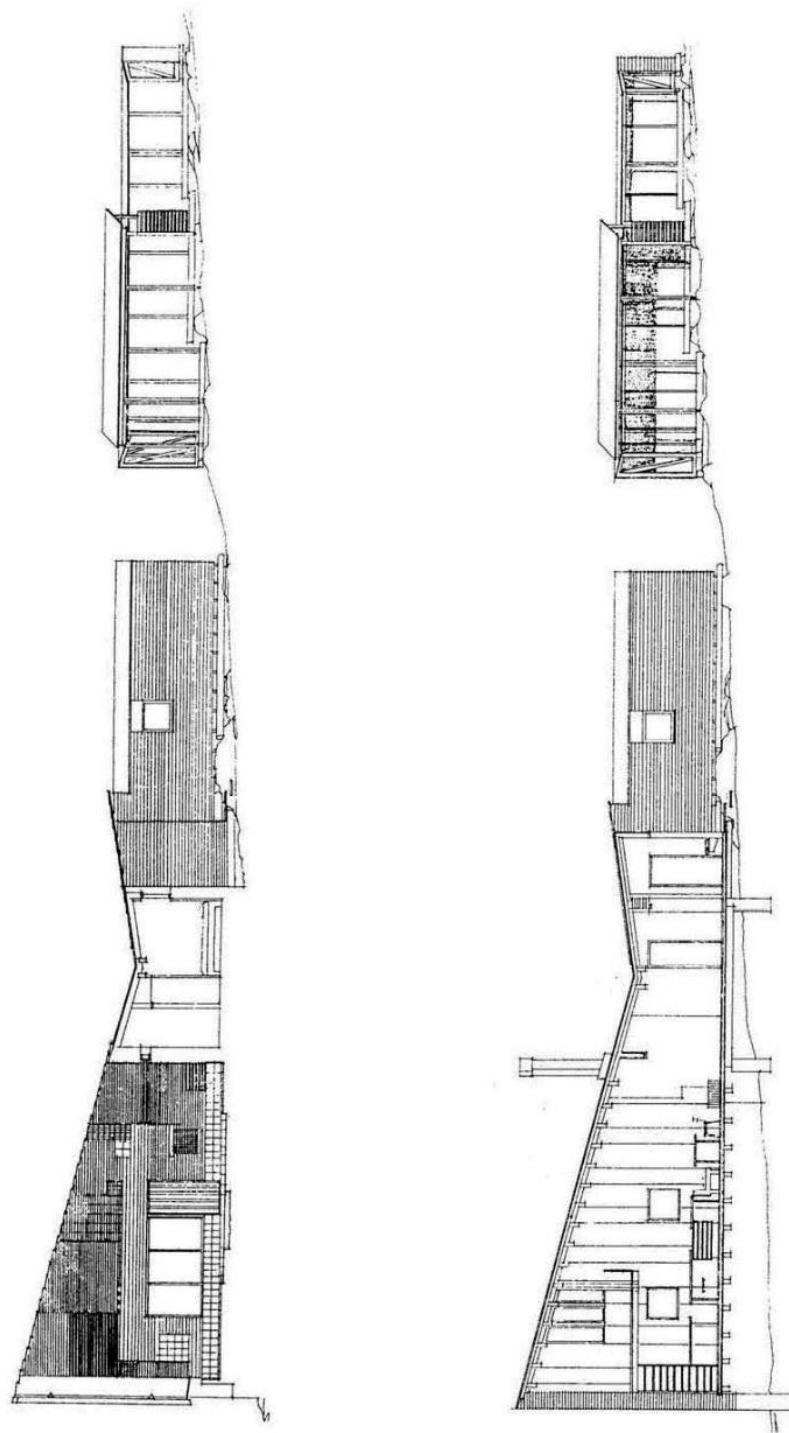
Anexo 4 – Planta arquitectónica, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



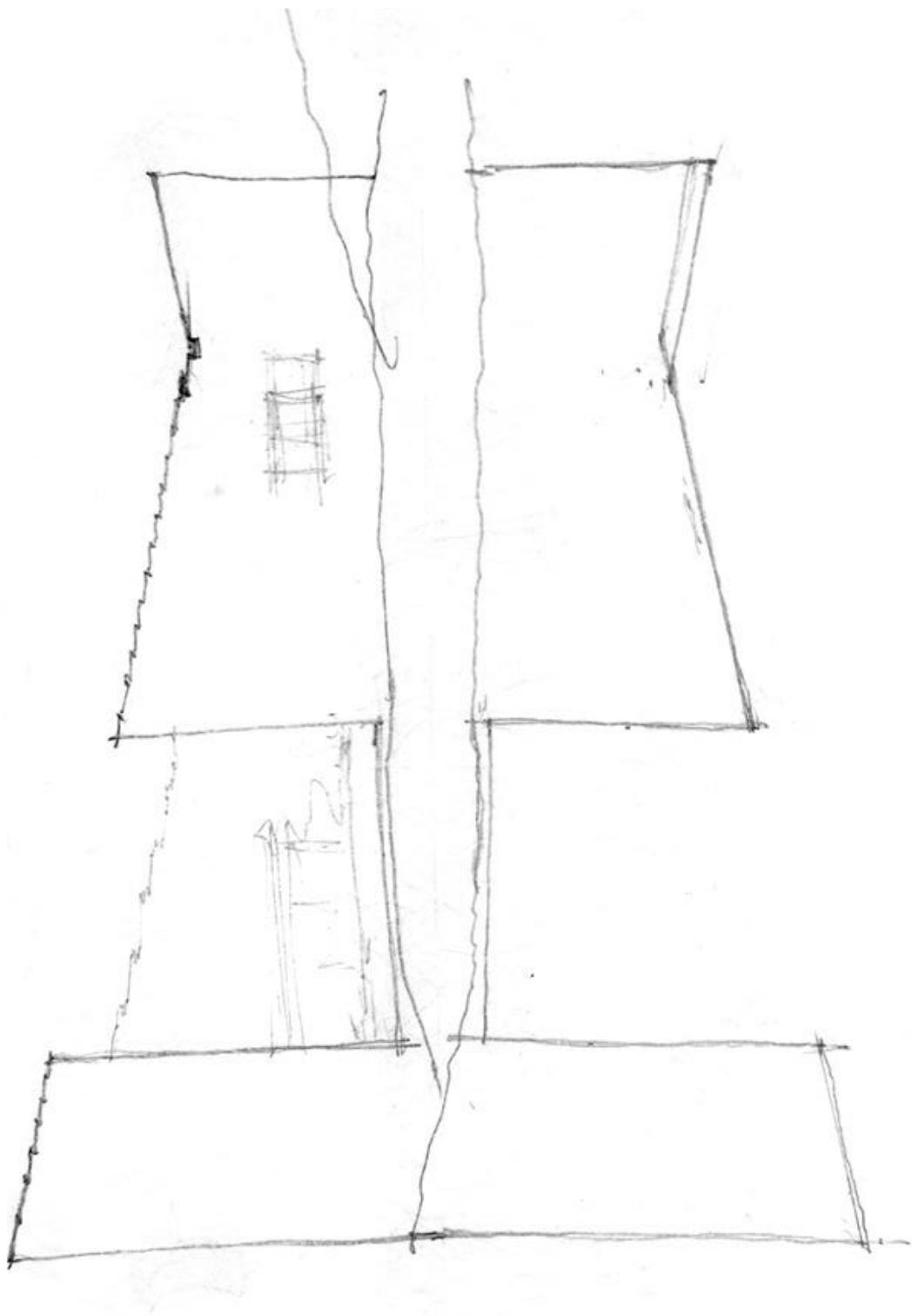
Anexo 5 – Boceto, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



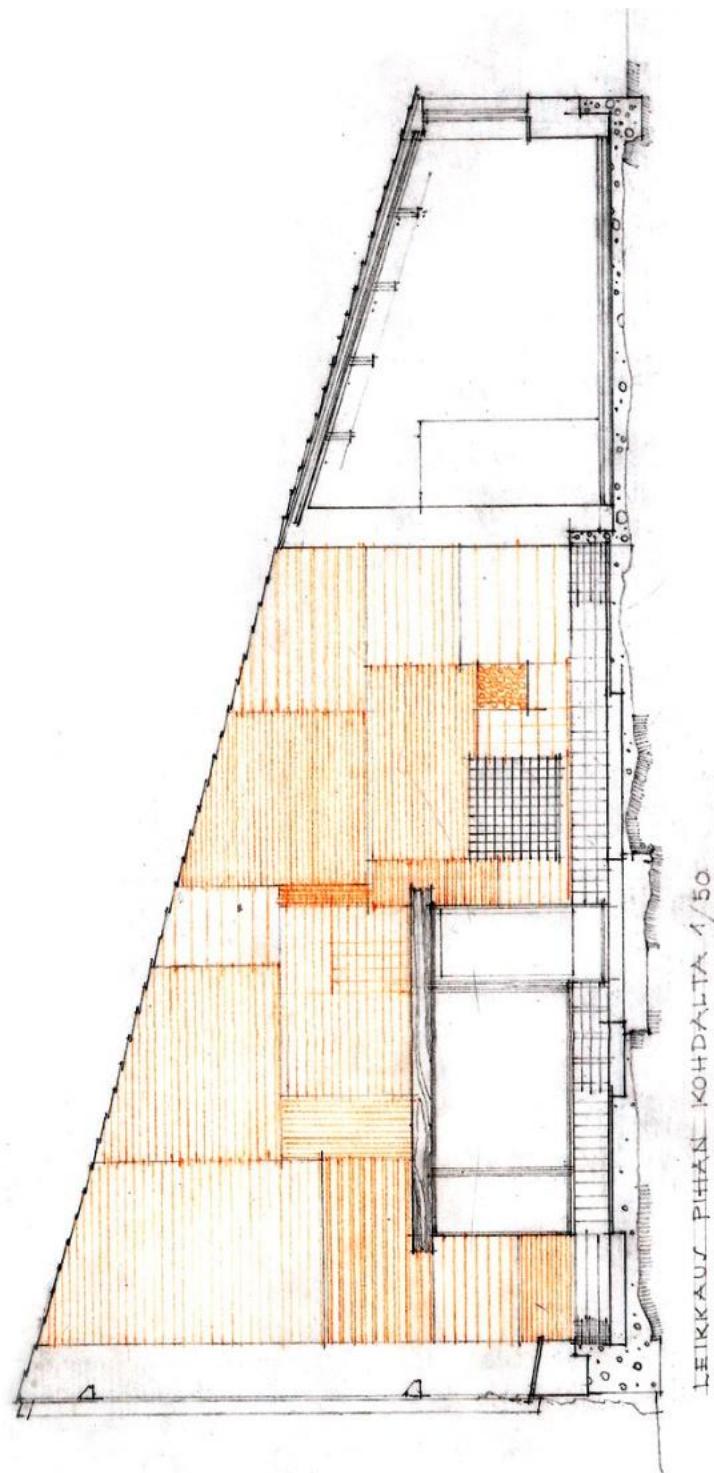
Anexo 6 – Sección transversal, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



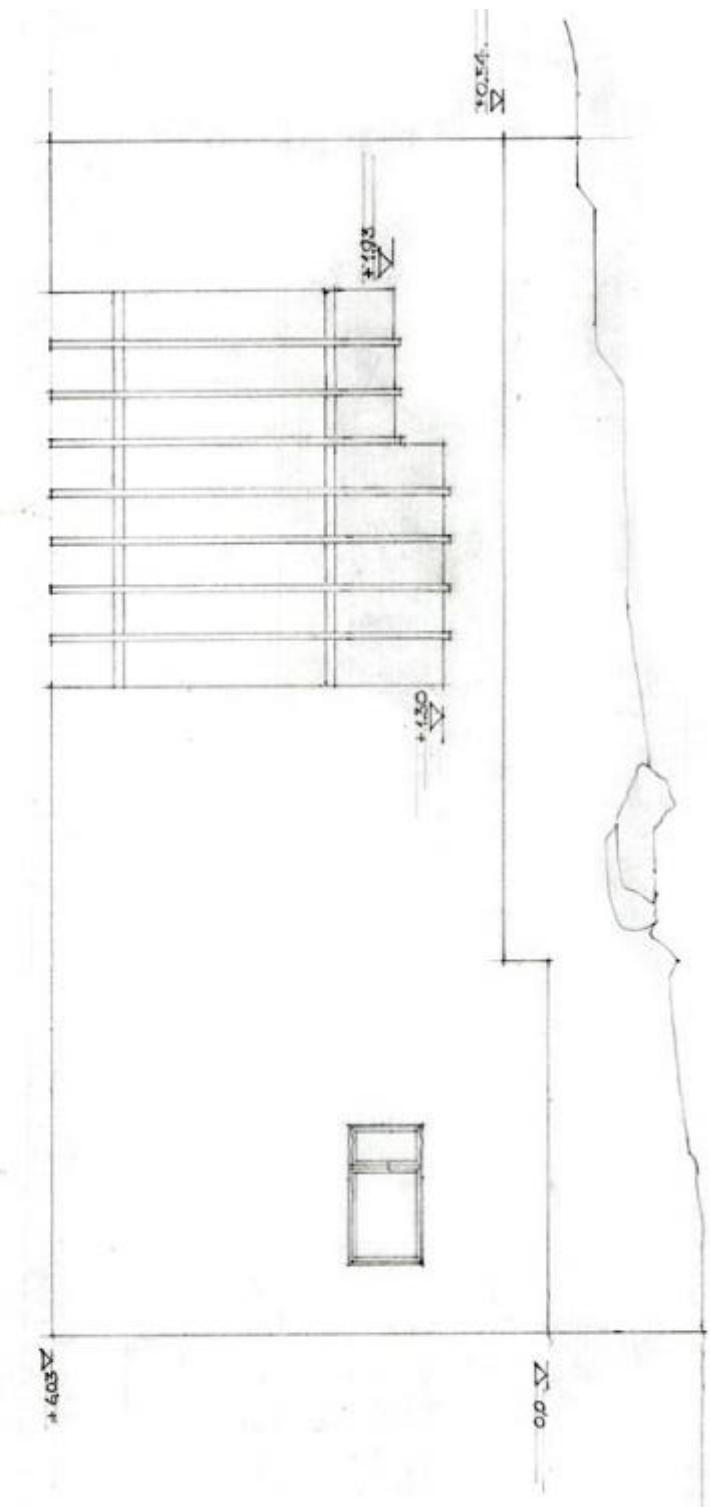
Anexo 7 – Alzado y Sección transversal, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



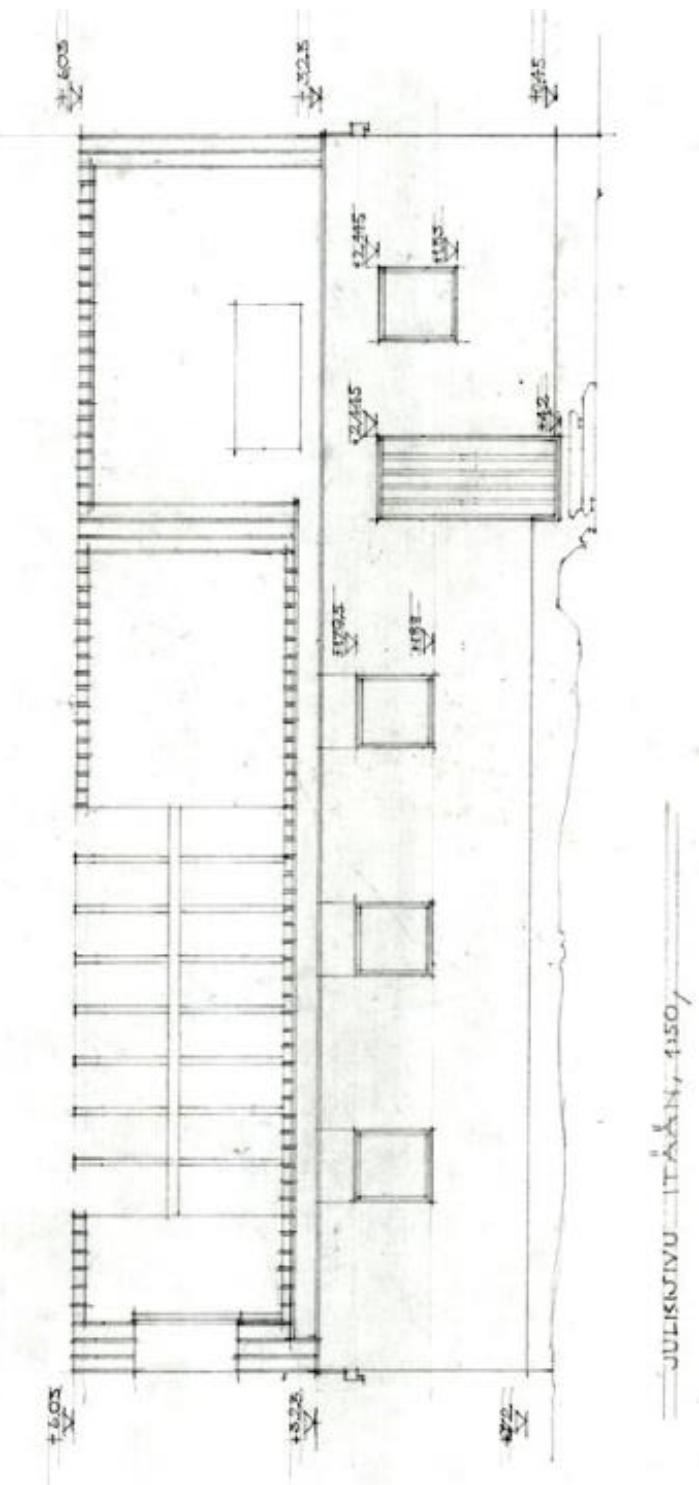
Anexo 8 – Boceto, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



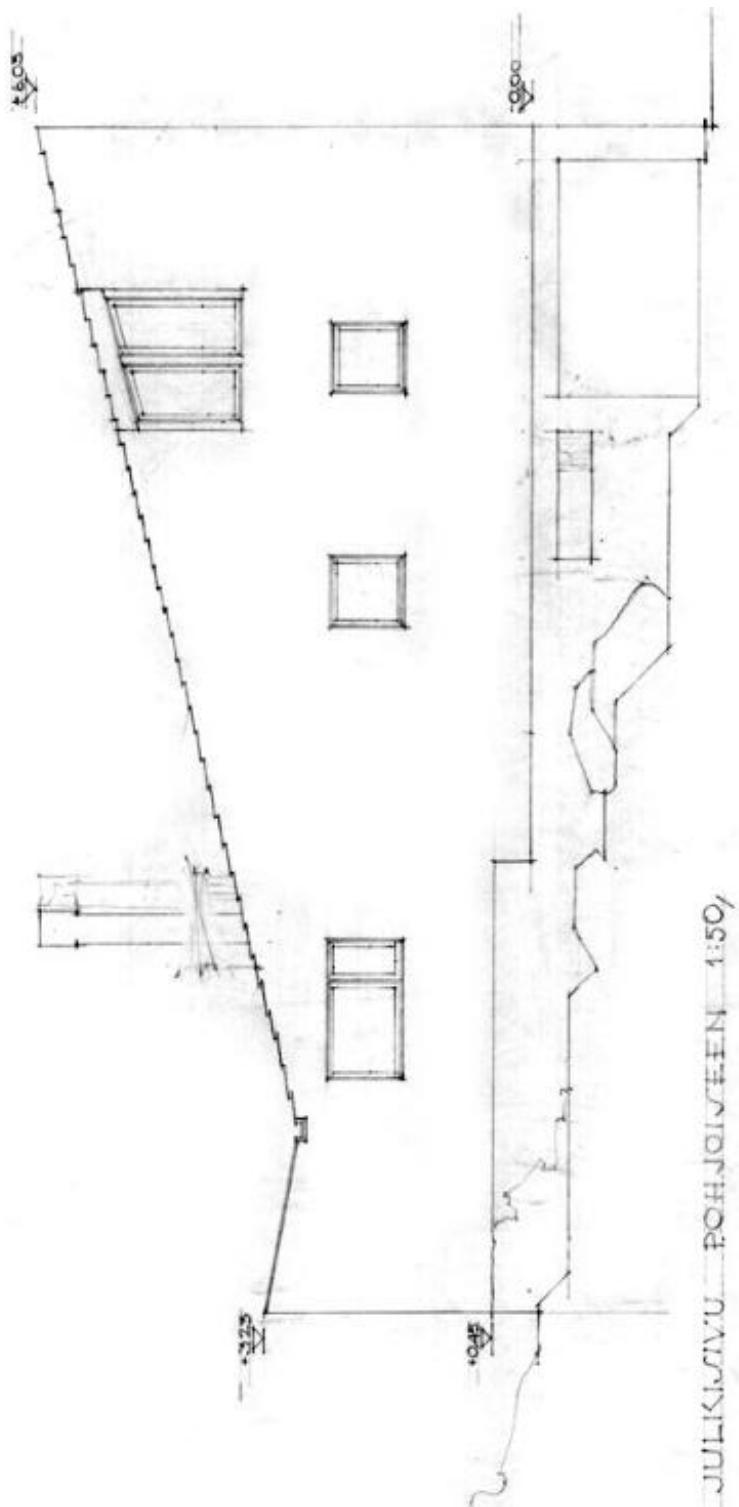
Anexo 9 - Tectónica Fachada, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



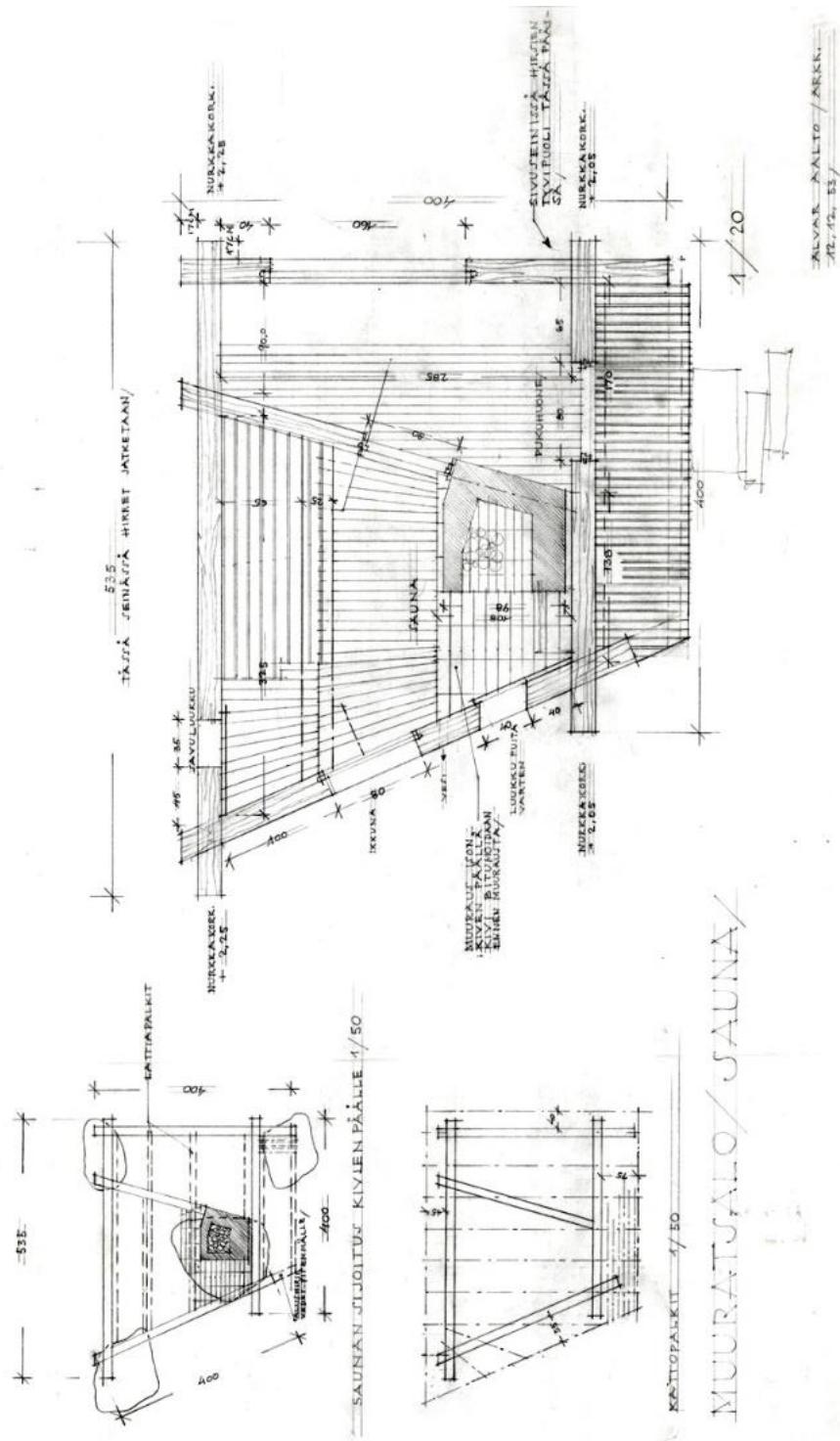
Anexo 10 - Alzado Noroeste, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 11 - Alzado Sureste, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.

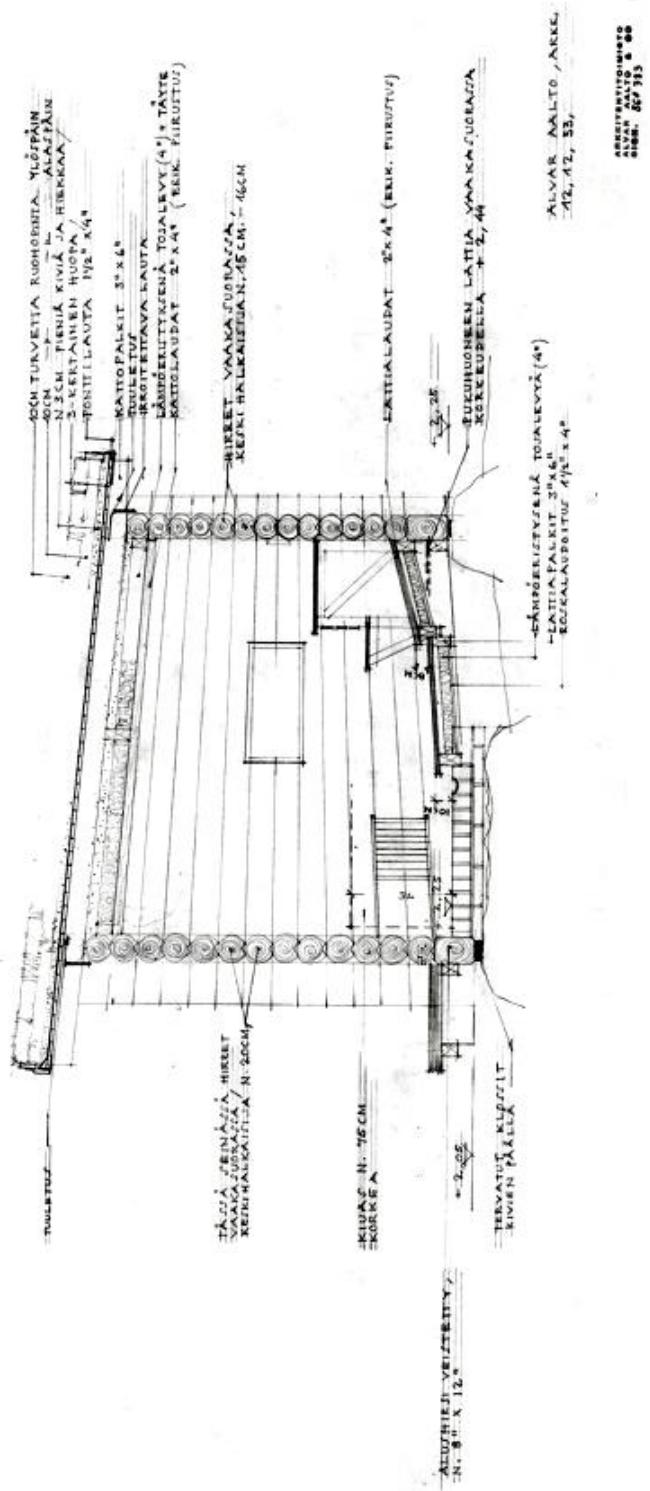


Anexo 12 - Alzado Noreste, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.

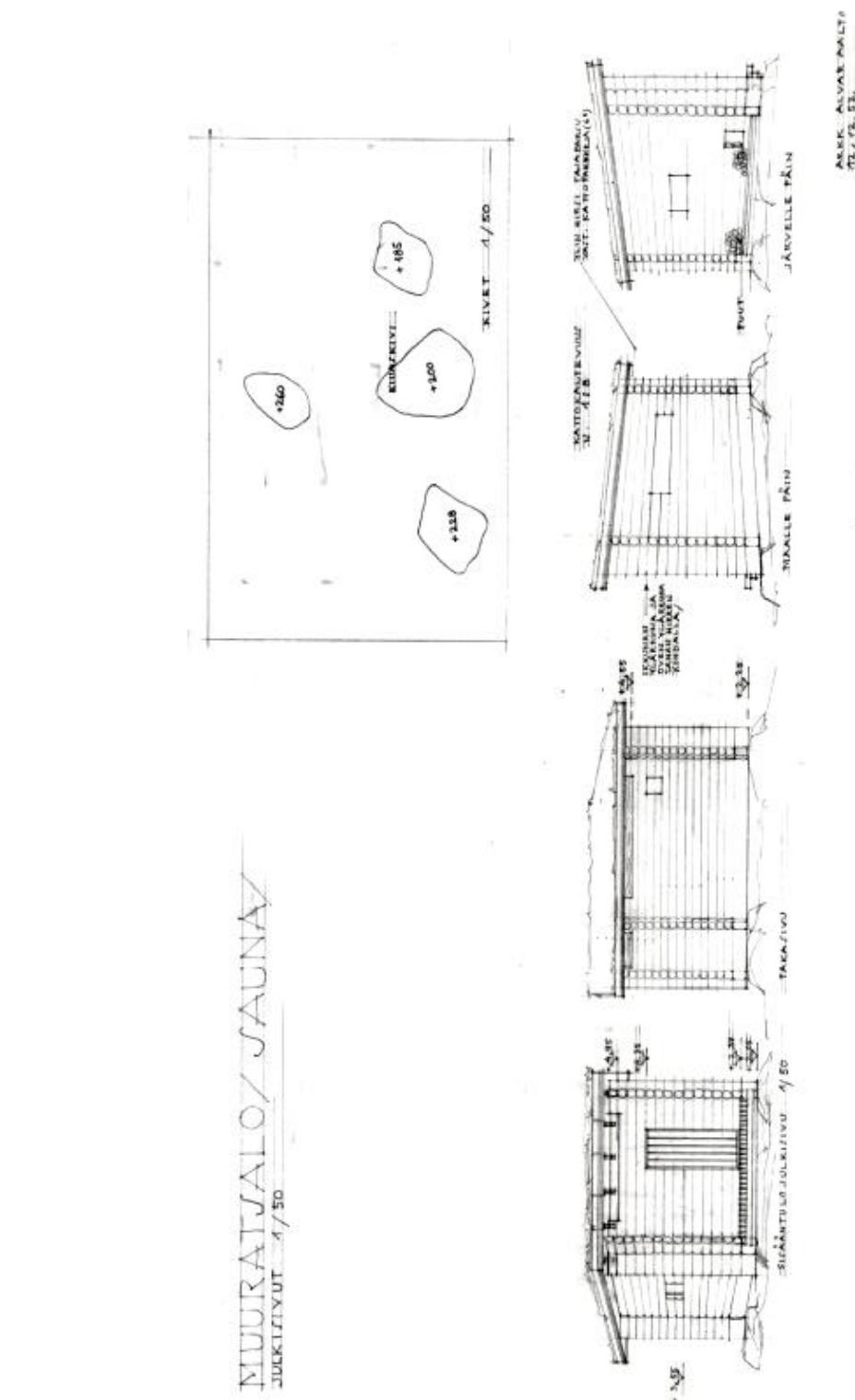


Anexo 13 - Sauna, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.

MUURATJÄLÖ / SAUNA /
POKKILEIKKAUJ 1/20



Anexo 14 – Alzado Sauna, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



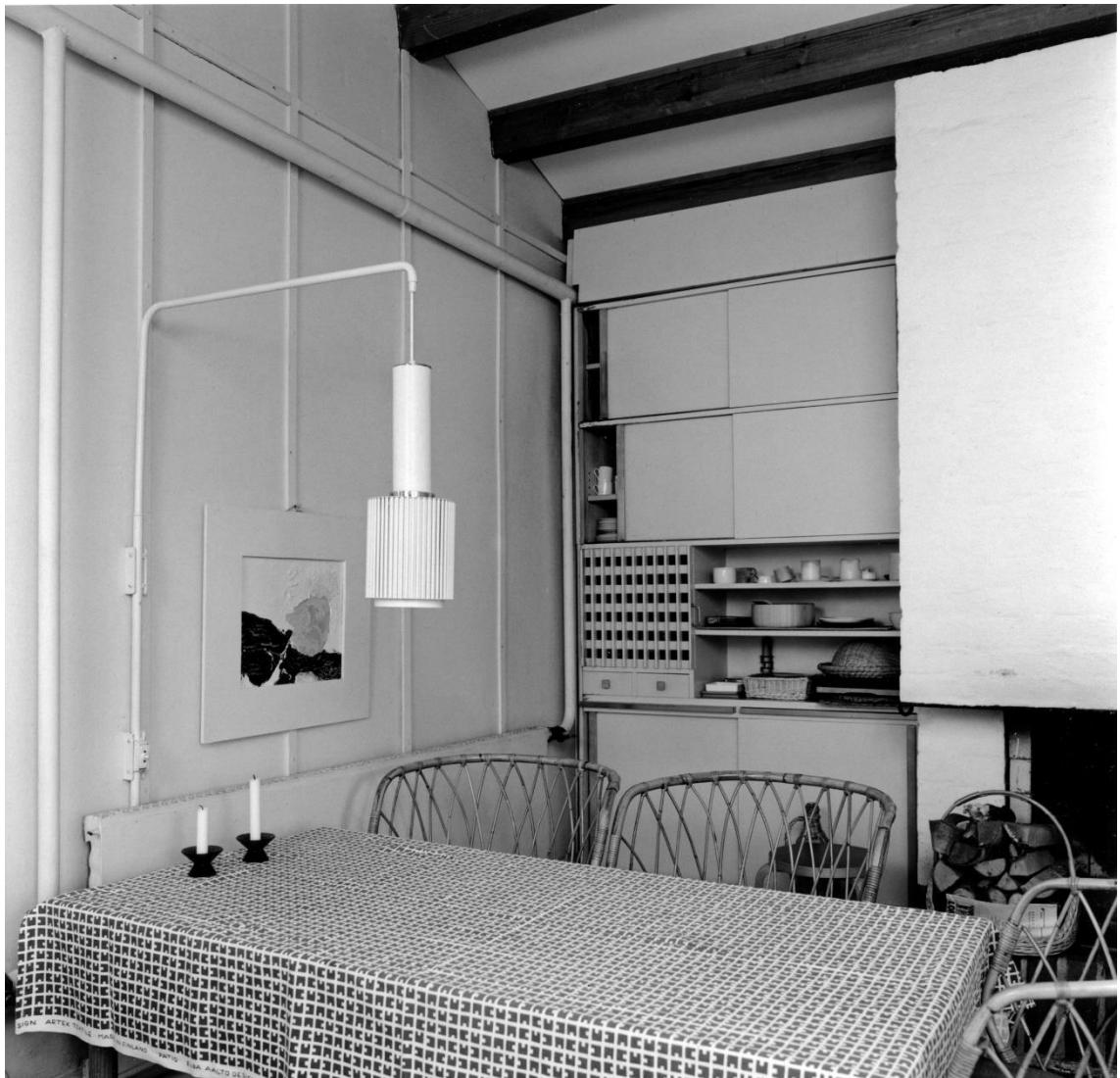
Anexo 15 - Alzados Sauna, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



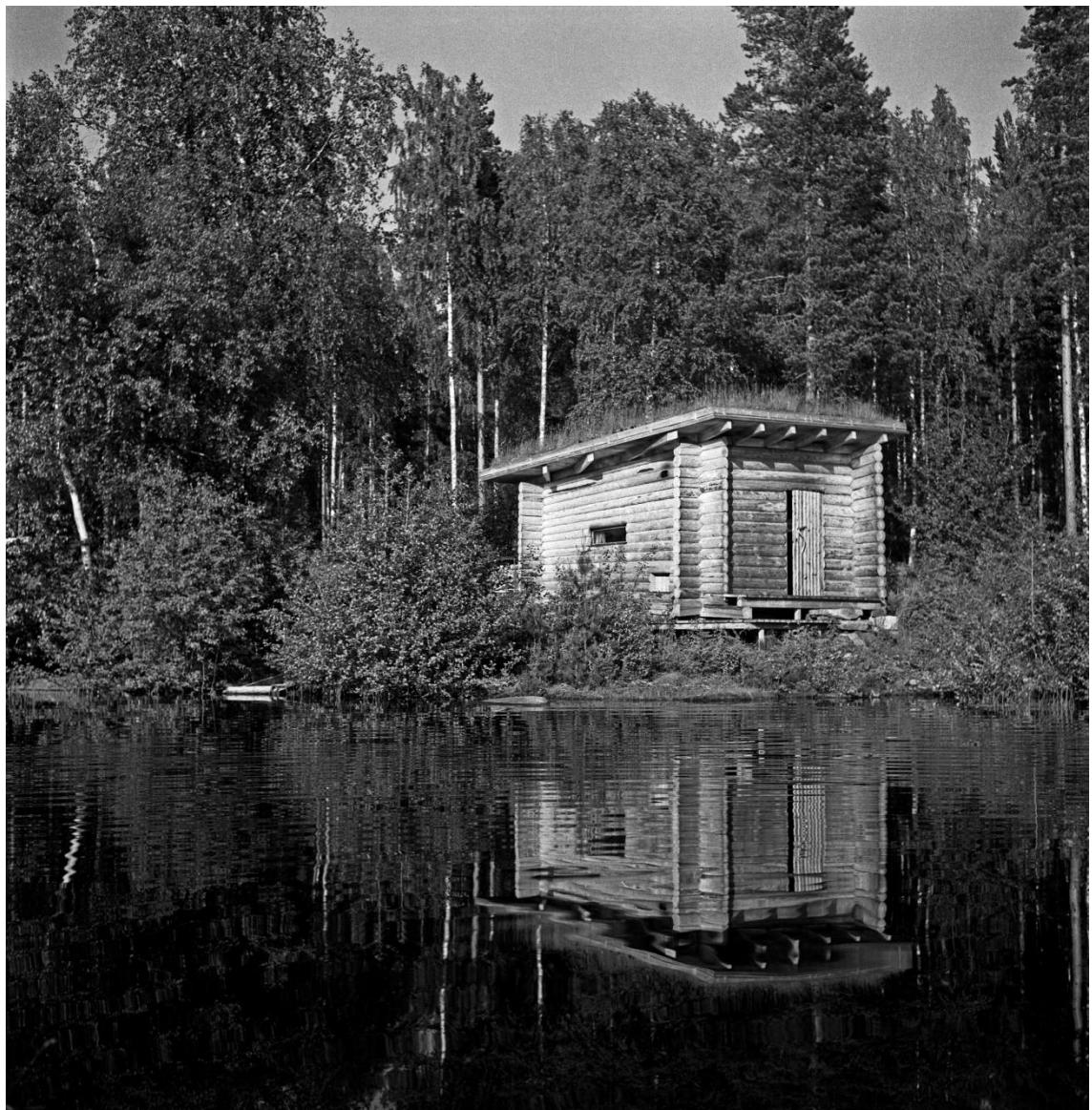
Anexo 16 – Alvar Aalto en su Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 17 – Elissa, esposa de Alvar Aalto, en su Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 18 – Interior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 19 – Sauna, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 20 – Entorno natural exterior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 21 – Fachada posterior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 22 – Fachadas Noreste de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 23 – Muro exterior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 24 – Fundaciones de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



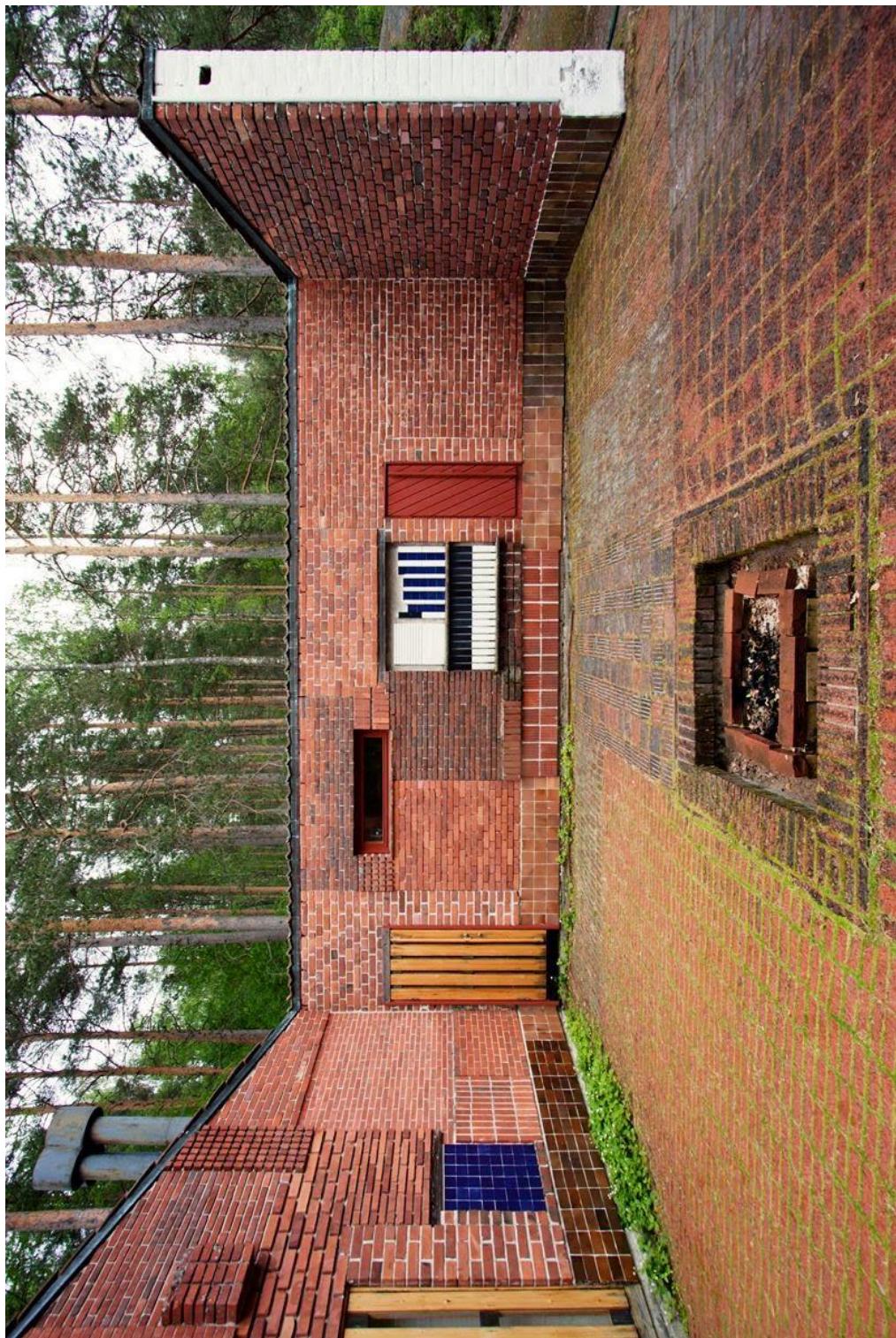
Anexo 25 – Patio interno de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 26 – Patio interno de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 27 – Patio interno de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



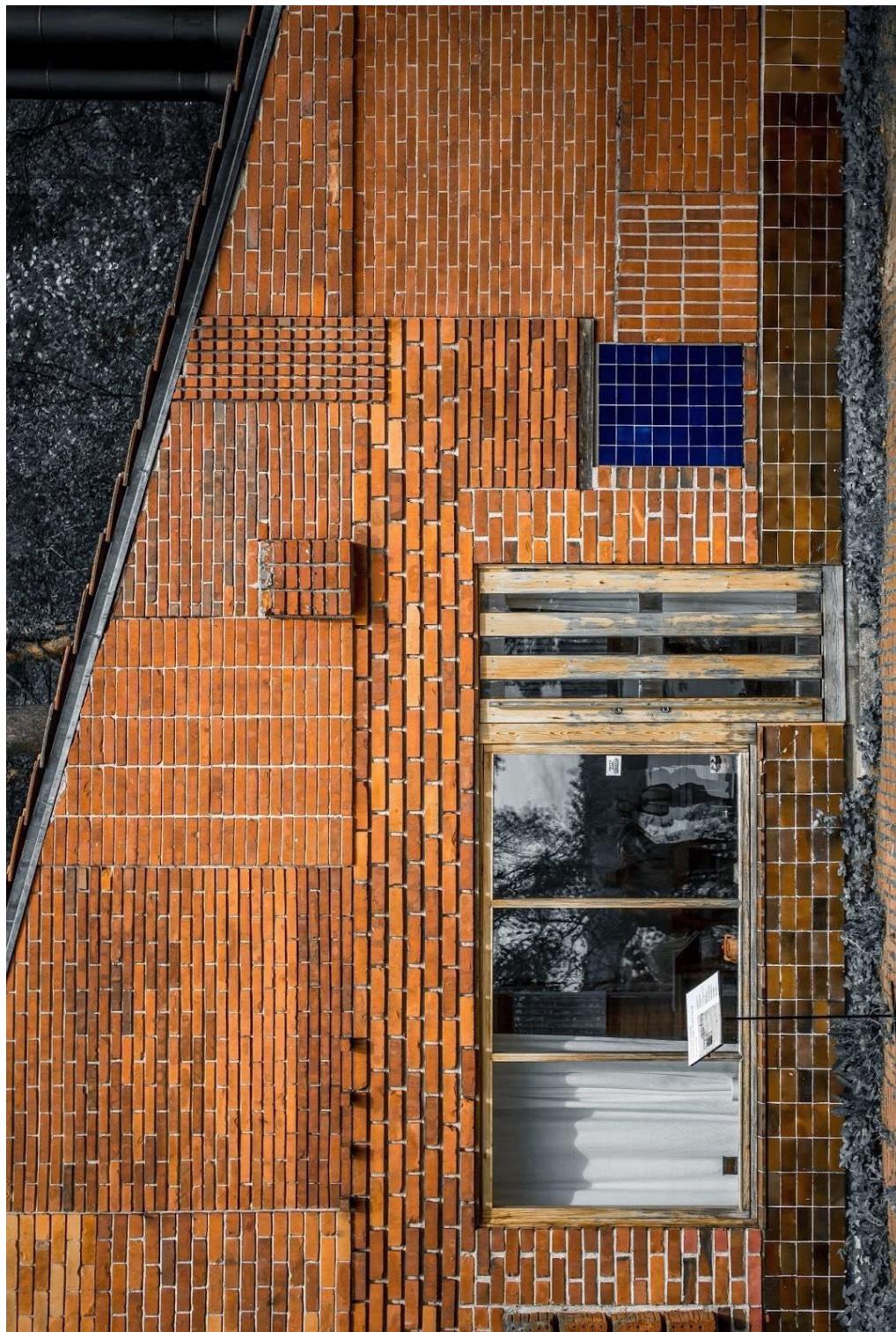
Anexo 28 – Patio interno de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 29 – Patio interno de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 30 – Tectónica pared exterior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



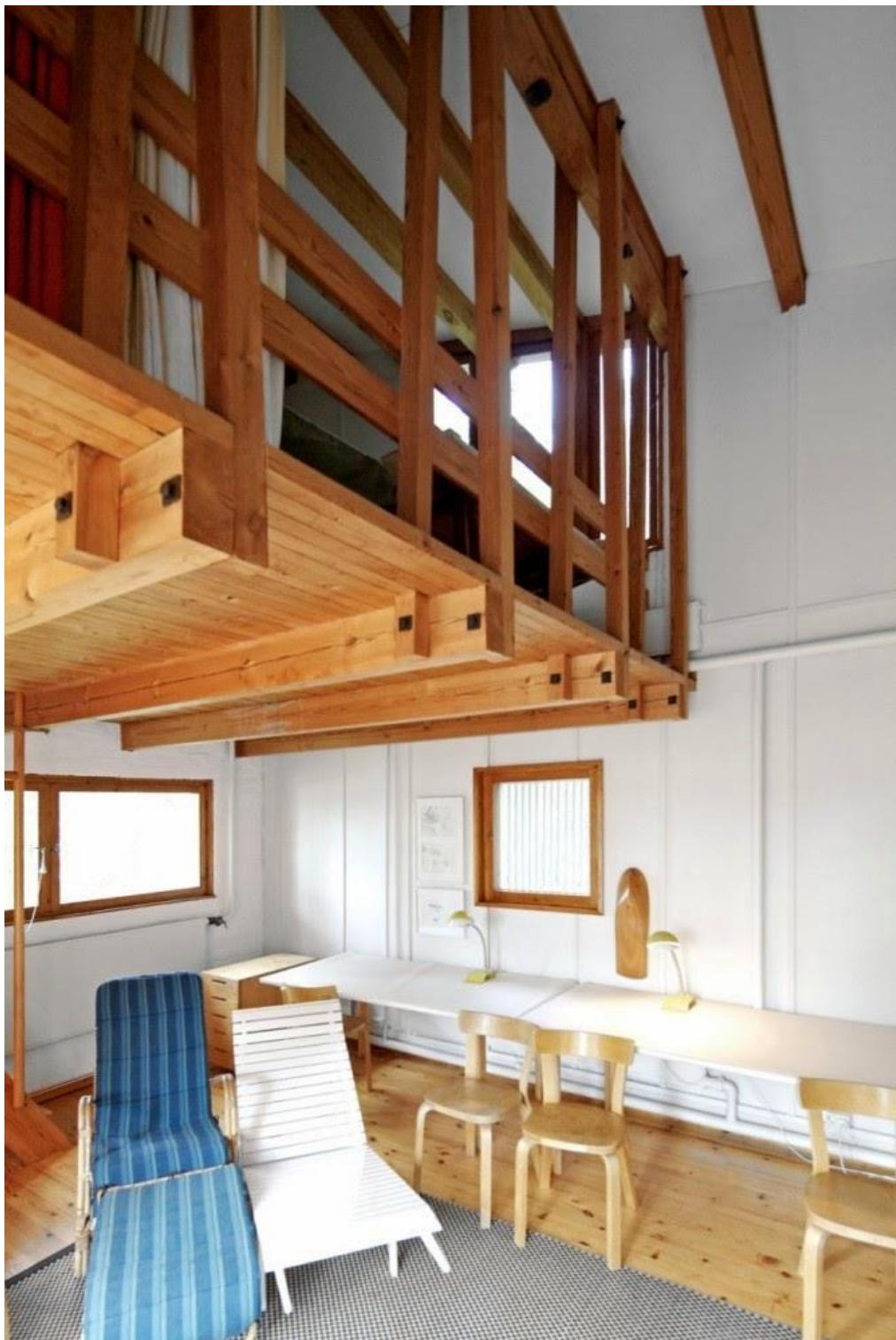
Anexo 31 - Tectónica pared exterior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 32 – Detalle ladrillos pared exterior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 33 – Interior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 34 - Interior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 35 – Pasillo interno, Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 36 - Interior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



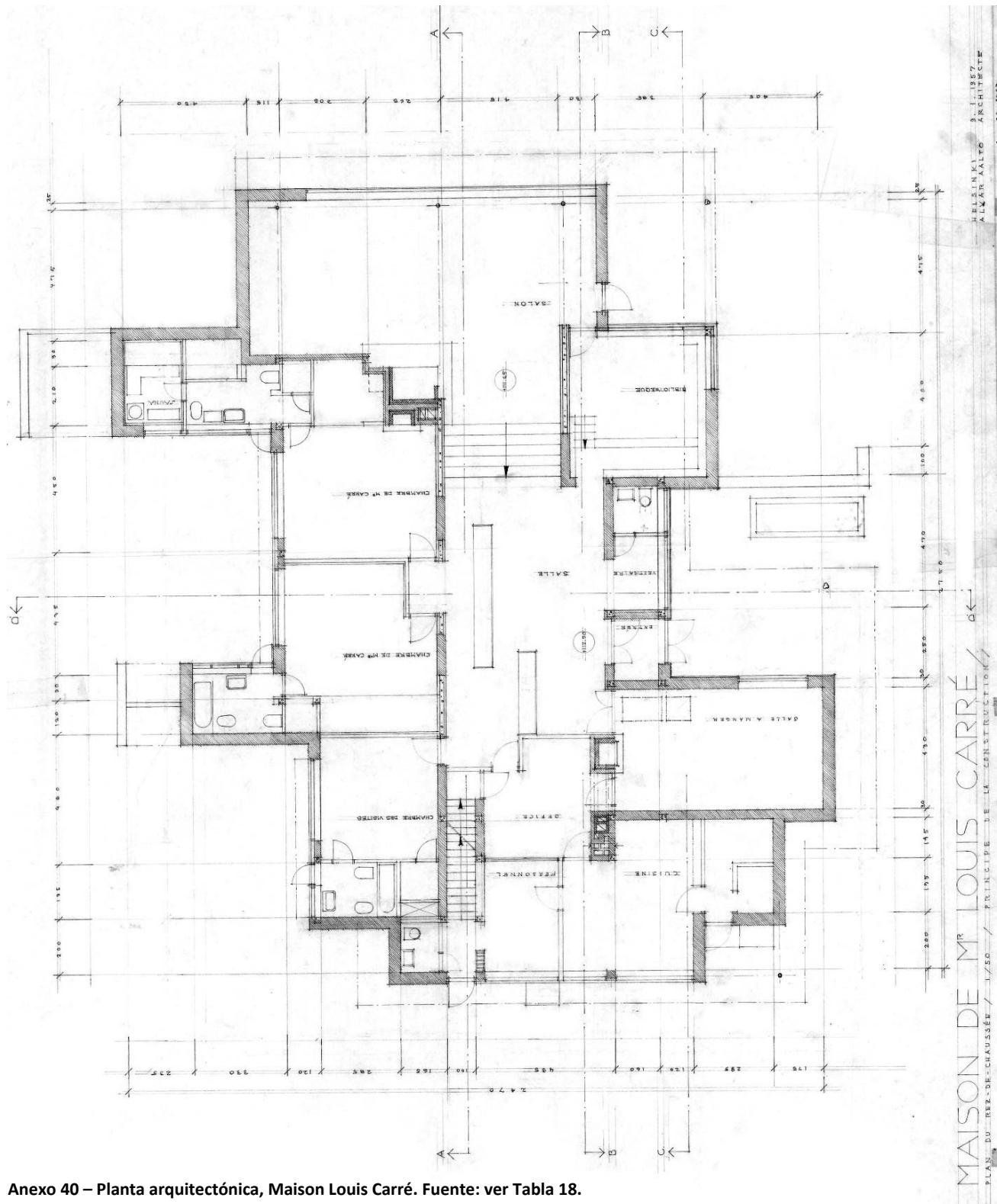
Anexo 37 - Interior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



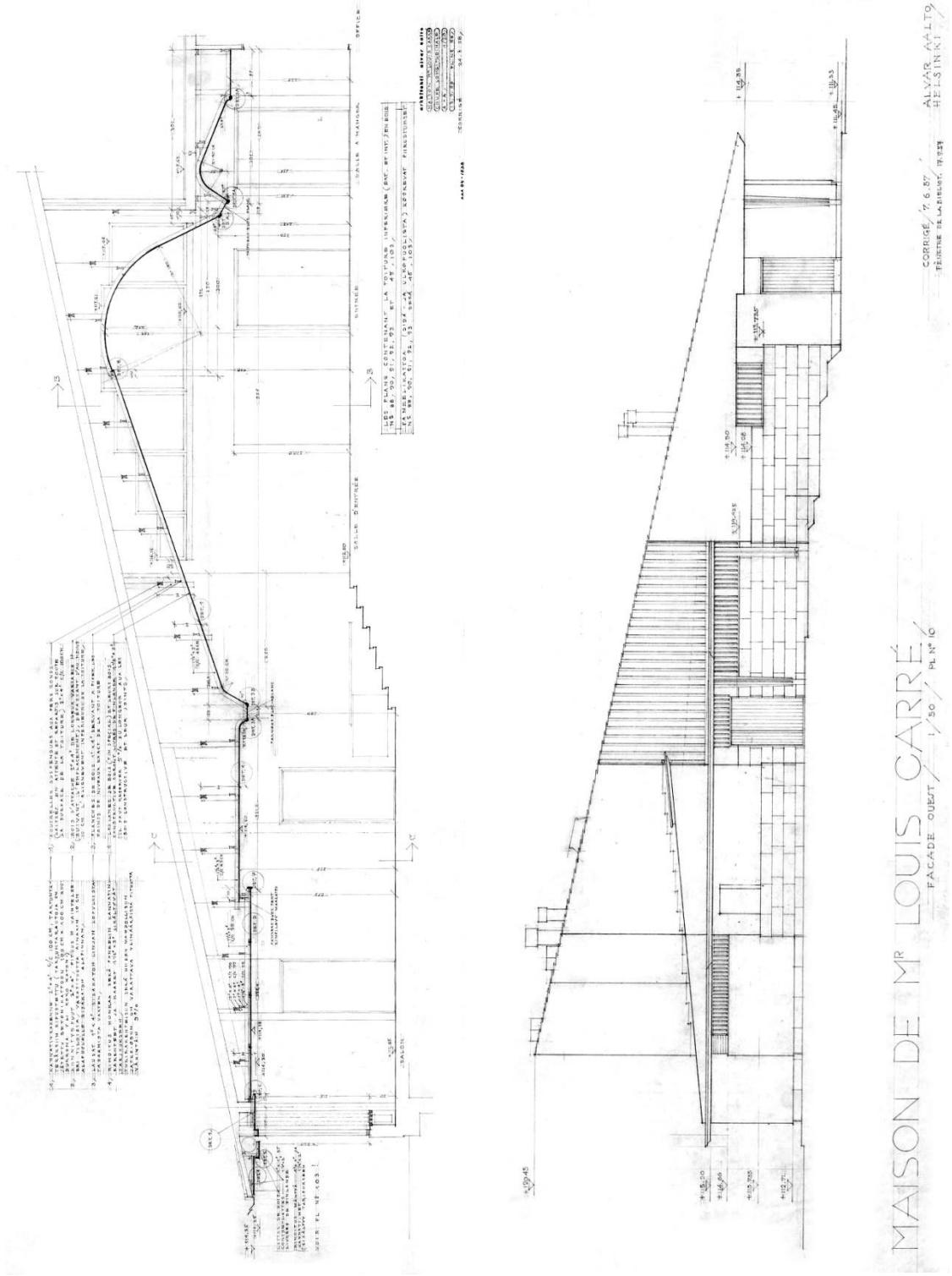
Anexo 38 - Dormitorio de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



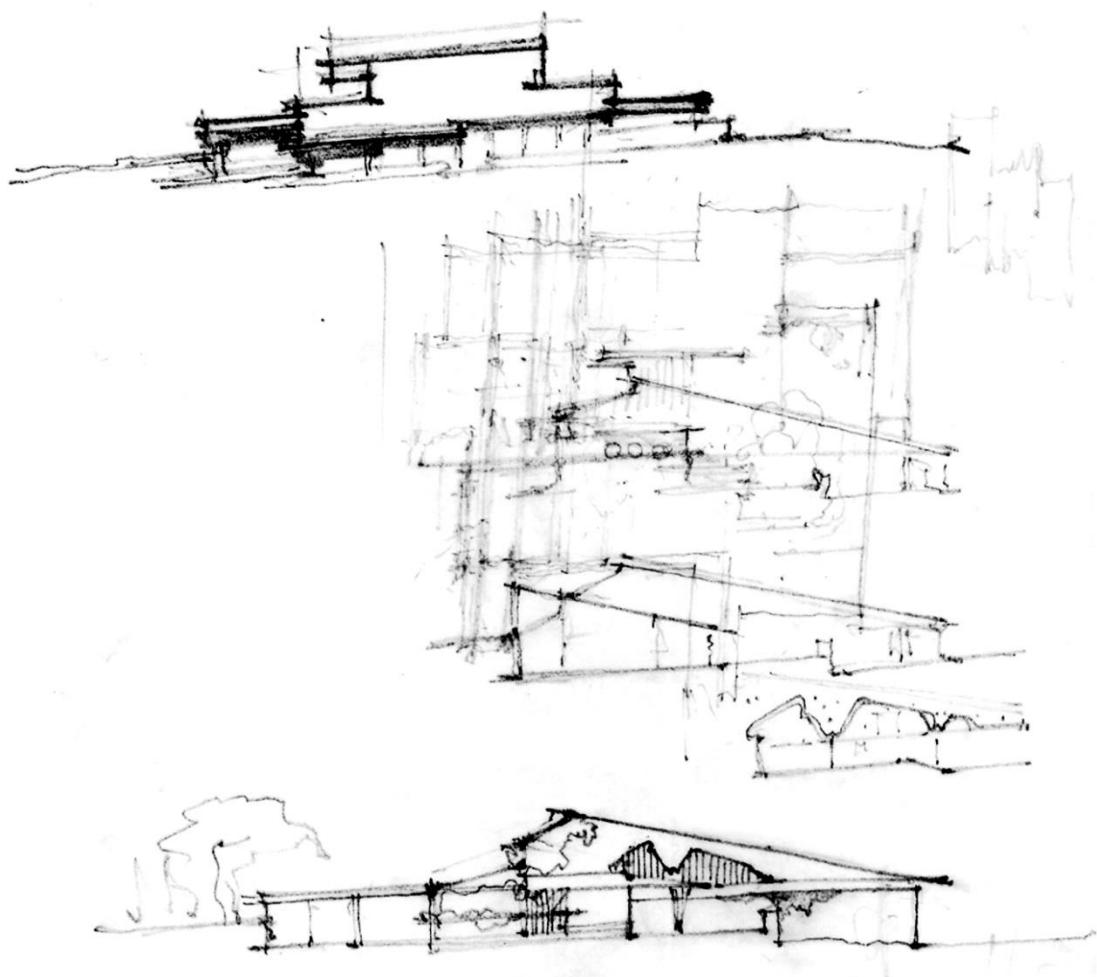
Anexo 39 – Vista exterior desde el interior de la Casa experimental de Muuratsalo. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 40 – Planta arquitectónica, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 41 – Sección y Alzado, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



AAA 84-1269

Anexo 42 - Bocetos, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



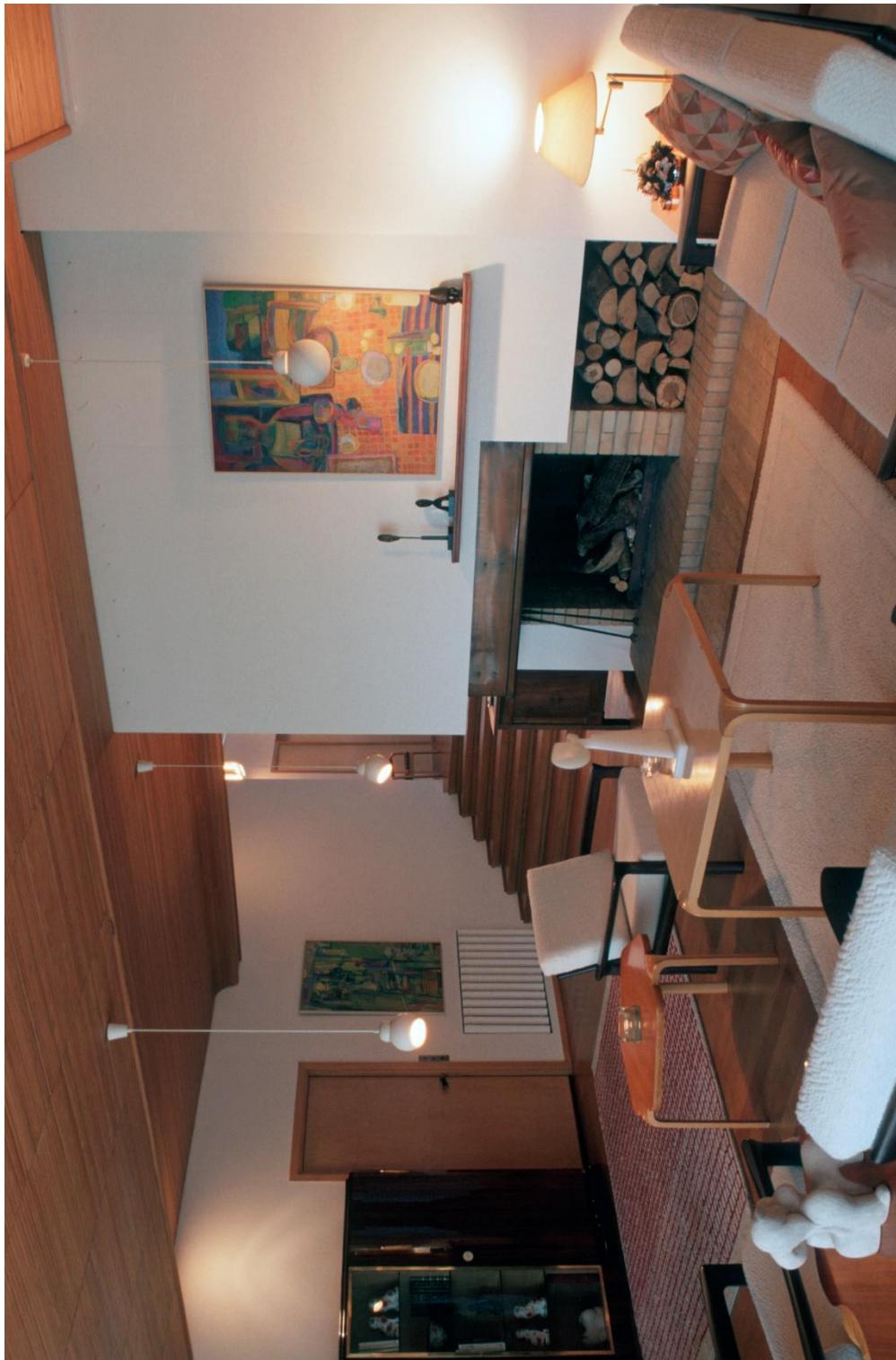
Anexo 43 – Vista Exterior, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 44 - Anfiteatro, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 45 – Acceso lateral, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 46 – Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 47 – Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 48 – Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 49 – Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 50 – Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 51 – Vista exterior, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 52- – Acceso lateral, Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 53 - – Vista exterior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 54 -- Vista exterior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



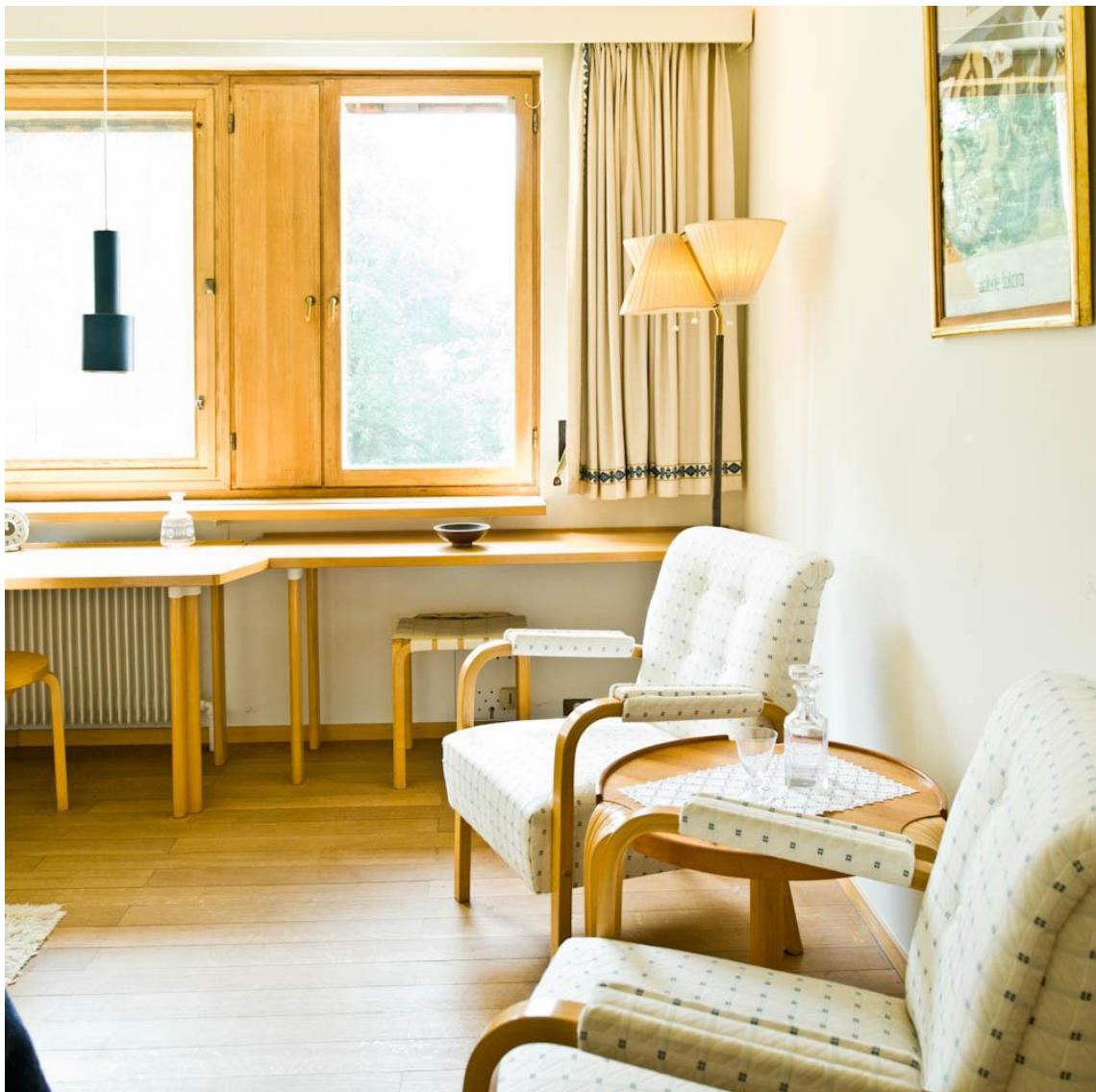
Anexo 55 – Vista exterior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



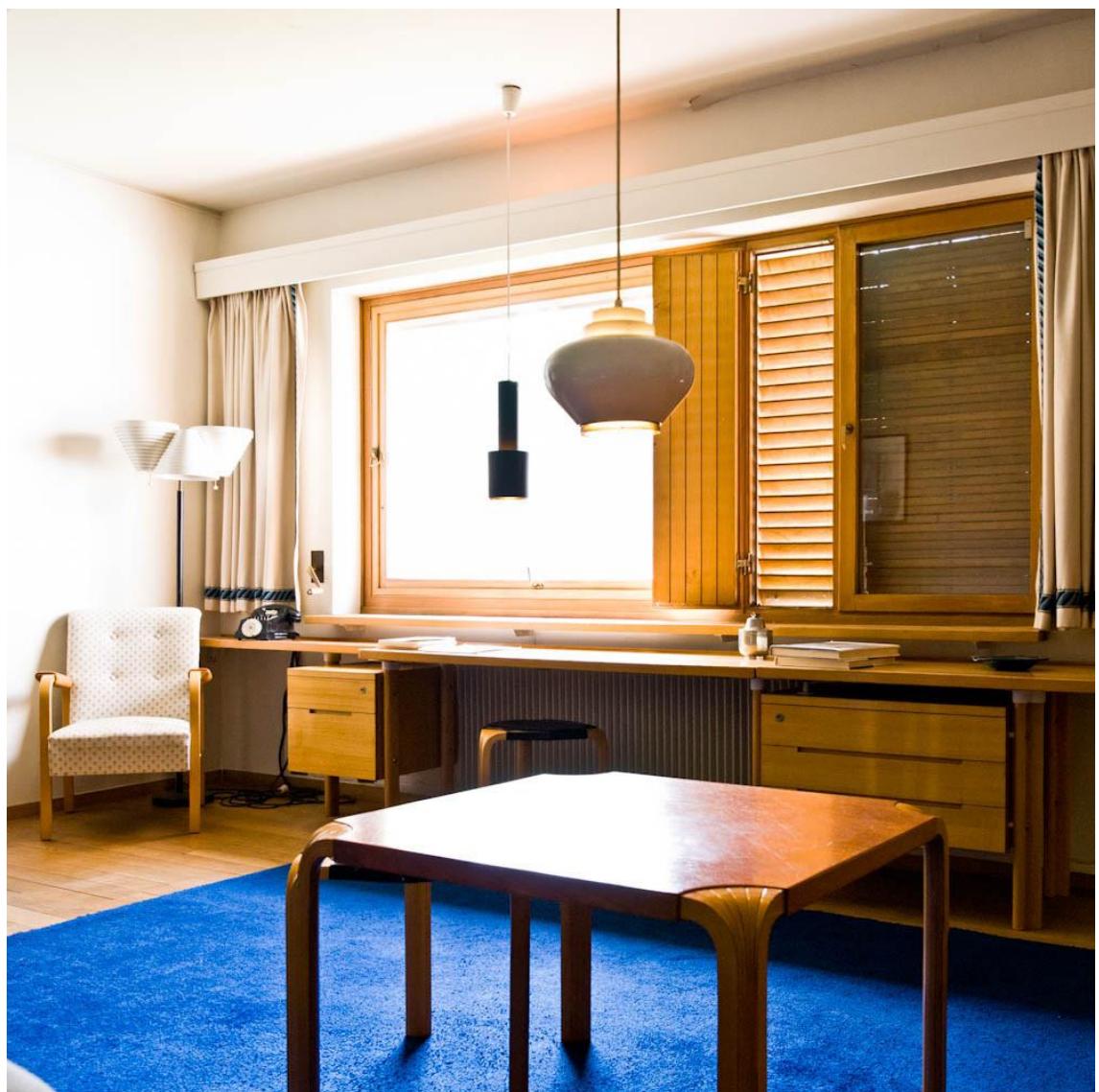
Anexo 56 - Acceso posterior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 57 – Acceso lateral de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



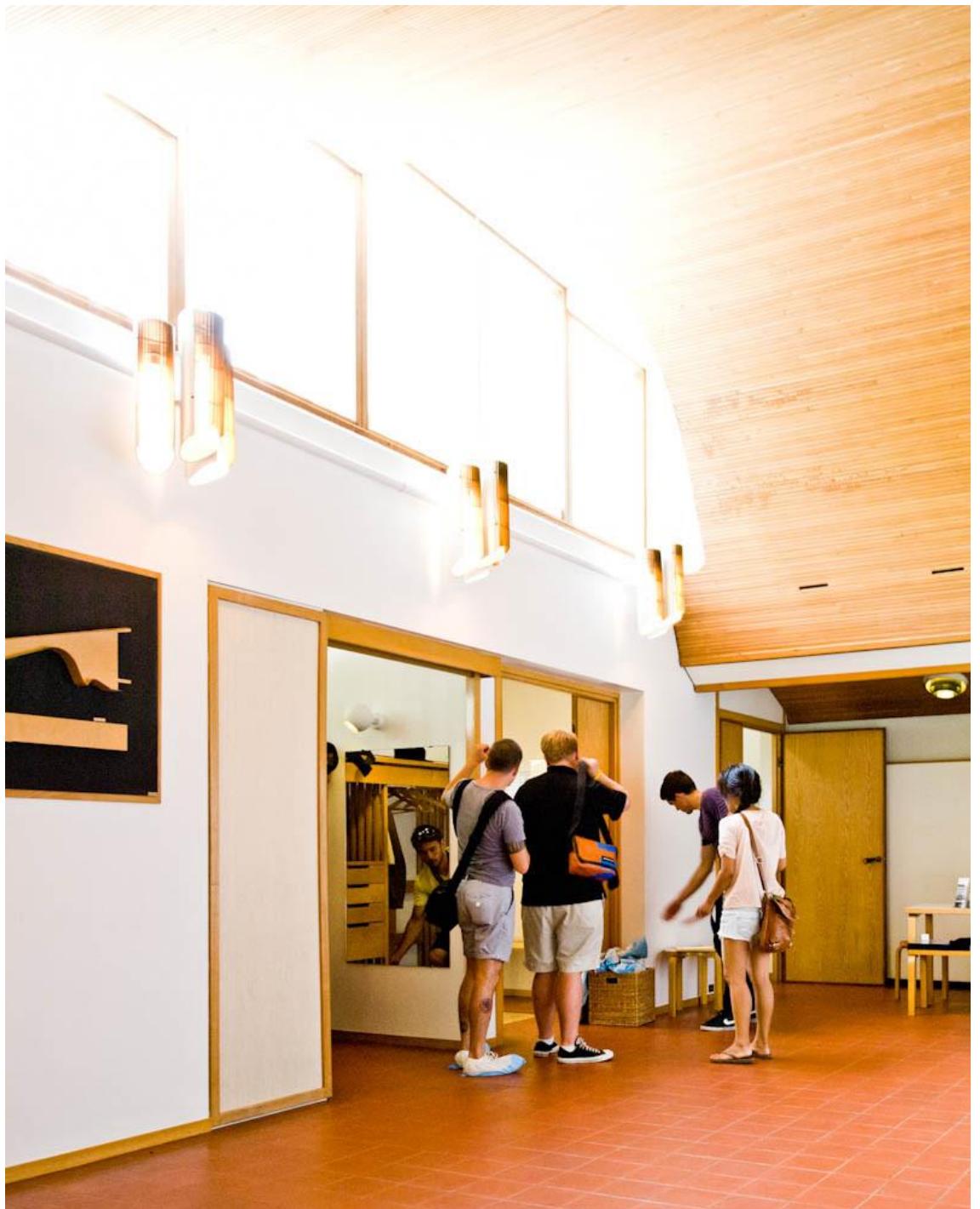
Anexo 58 - Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



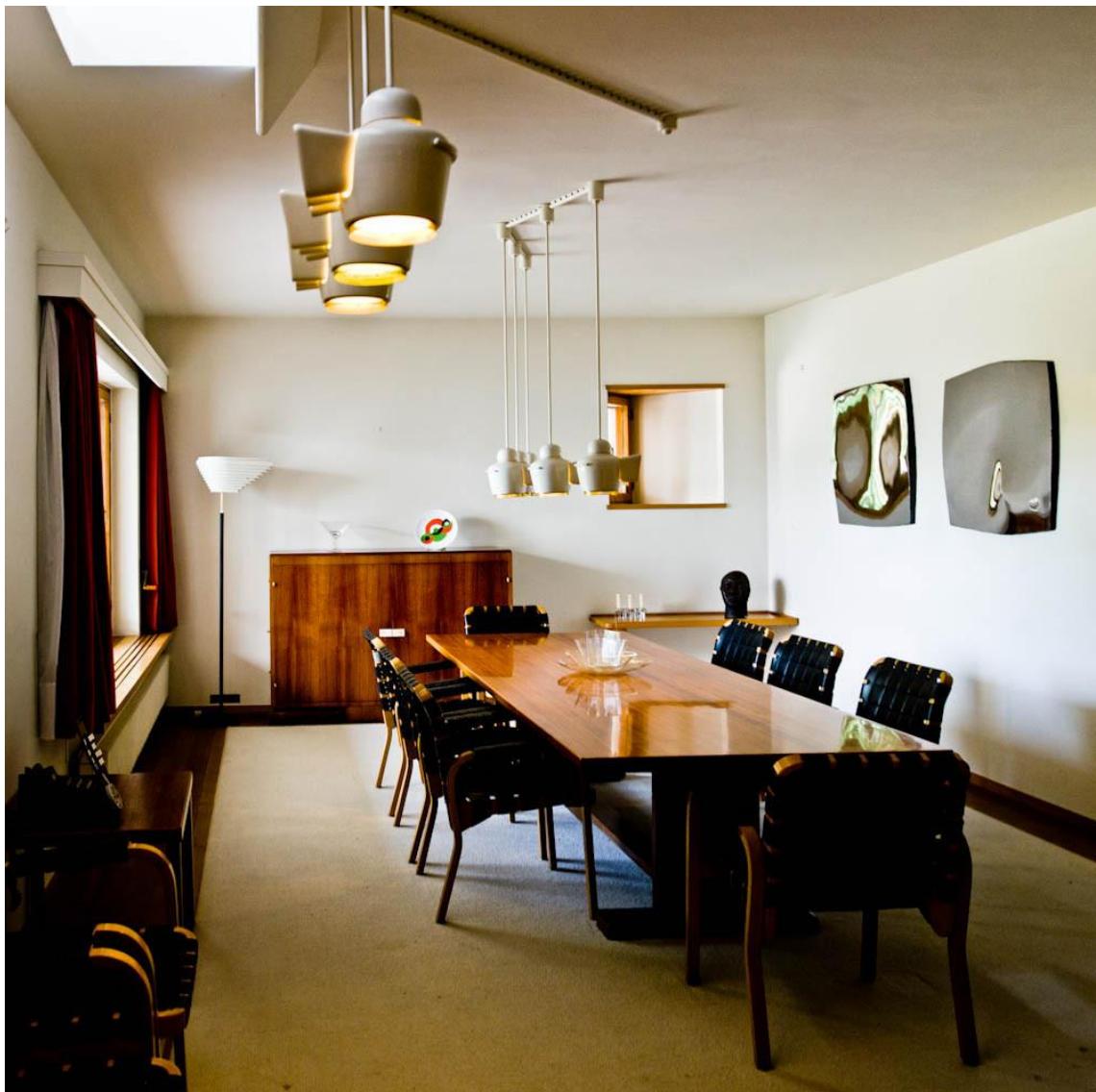
Anexo 59- Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 60 - Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 61 - Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.



Anexo 62 - Vista interior de la Maison Louis Carré. Fuente: ver Tabla 18.