

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA
MAESTRÍA EN INFORMÁTICA



TESIS

**SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO EN VIVIENDAS ALTOANDINAS
SOSTENIBLES CON CLIMATIZACIÓN PASIVA EN LA PROVINCIA
DE "EL COLLAO", 2016**

**PRESENTADA POR:
ARTURO FLORES CONDORI**

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAGÍSTER SCIENTIAE EN INFORMÁTICA
MENCIÓN EN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

**PUNO, PERÚ
2018**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**ESCUELA DE POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA
MAESTRÍA EN INFORMÁTICA**



TESIS

**SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO EN VIVIENDAS
ALTOANDINAS SOSTENIBLES CON CLIMATIZACIÓN PASIVA EN LA
PROVINCIA DE “EL COLLAO”, 2016**

PRESENTADA POR:

ARTURO FLORES CONDORI

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTAE EN INFORMÁTICA

MENCIÓN EN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

.....
Dr. EDGAR ELOY CARPIO VARGAS

PRIMER MIEMBRO

.....
Dr. ALEJANDRO APAZA TARQUI

SEGUNDO MIEMBRO

.....
M.Sc. CELSO WILFREDO CALSIN VELÁSQUEZ

ASESOR DE TESIS

.....
M.Sc. PEDRO LEONARDO QUISPE TICONA

Puno, 26 de Diciembre de 2017

ÁREA: Simulación computacional evolutiva multi-objetivo.

TEMA: Simulación del desempeño térmico sostenible.

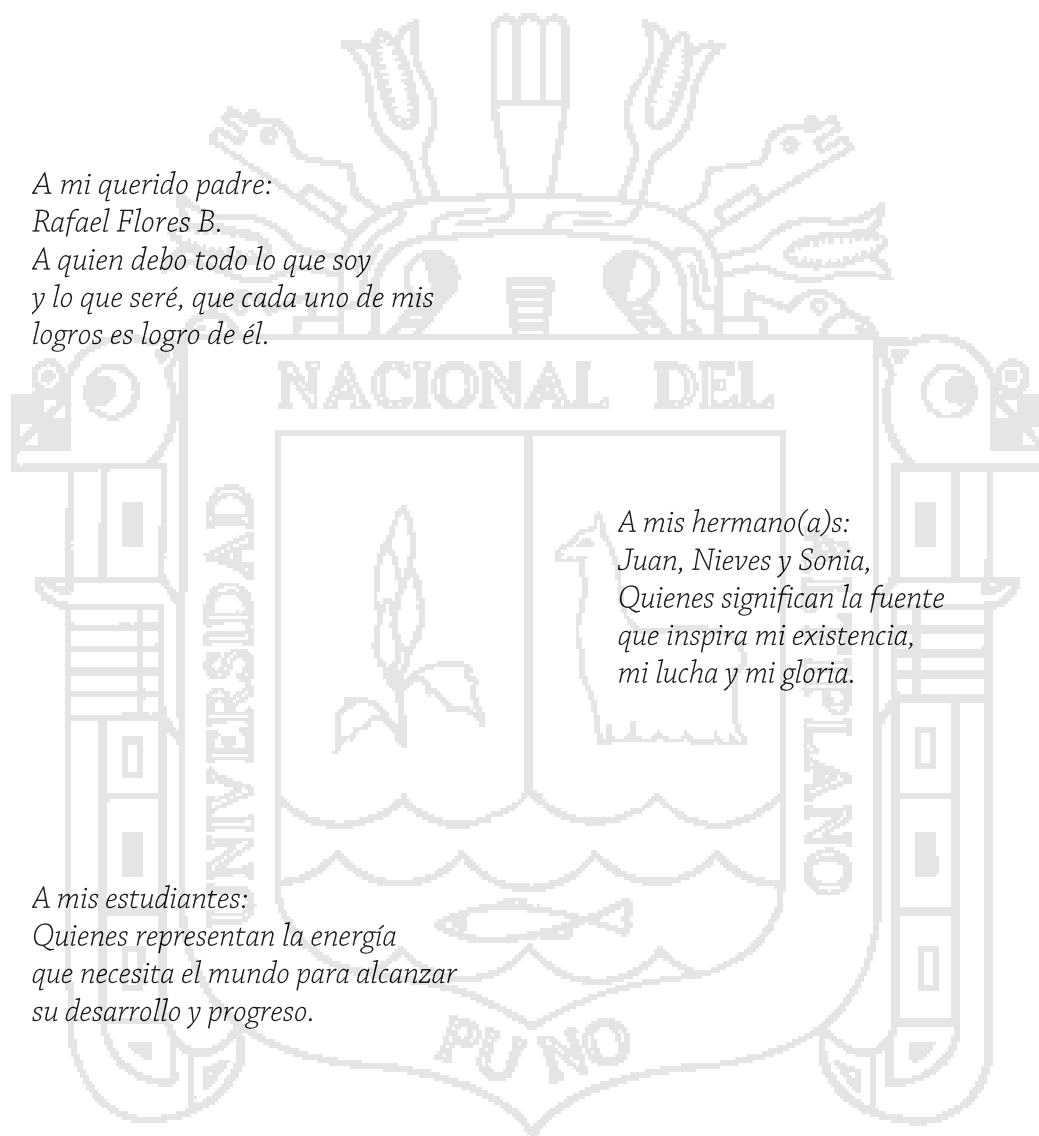
DEDICATORIA

*Con amor incondicional dedicada a la memoria
de mi querida madre: Vicenta Condori A.*

*A mi querido padre:
Rafael Flores B.
A quien debo todo lo que soy
y lo que seré, que cada uno de mis
logros es logro de él.*

*A mis hermano(a)s:
Juan, Nieves y Sonia,
Quienes significan la fuente
que inspira mi existencia,
mi lucha y mi gloria.*

*A mis estudiantes:
Quienes representan la energía
que necesita el mundo para alcanzar
su desarrollo y progreso.*



AGRADECIMIENTOS

A Dios en primer lugar, por la dirección y haberme concedido el privilegio de optar a estudios de Postgrado. Este trabajo de investigación ha sido posible gracias a la solidaridad y al apoyo constante de muchas personas y en especial a mi padre y a mis hermanos por su amor, optimismo, buen humor, su ejemplo, su apoyo sin medida que han sido vitales durante toda mi formación. Cada una está en mi memoria y solo siento no poder mencionarlas a todas. Aun así, con gusto doy cumplimiento a este apartado casi preceptivo.

Asimismo doy las gracias a los docentes del programa de Maestría en Informática de la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, por su valiosa enseñanza y permanente orientación en mis estudios de maestría.

Al M.Sc. Pedro Leonardo Quispe Ticona, de la Orden, que gentilmente se prestó a dirigir el estudio. Las discusiones con él, sus consejos y su confianza, me han ido asegurando y potenciando, hasta hacer posible estos resultados.

A todas aquellas personas, amigos, compañeros que estuvieron implicadas en el entorno de este trabajo y que con su apoyo, consejos y amistad, empujaron a un servidor para lograr el objetivo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXO.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5
1.3. PREGUNTAS DEL PROBLEMA	7
1.3.1. Enunciado General	7
1.3.2. Enunciados específicos.....	7
1.4. OBJETIVOS	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos	8
1.5.1. Hipótesis General.....	8
1.5.2. Hipótesis Específicos	8
1.6. ANTECEDENTES	9
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	
2.1. TRANSFERENCIAS DE CALOR Y MASA EN EDIFICIOS.....	16
2.1.1. Conducción	17
2.1.2. Convección	18
2.1.3. Radiación.....	23
2.1.4. Conductividad térmica, Densidad, Calor específico y Resistencia térmica ..29	
2.1.5. Edificios como un sistema integral	31
2.1.6. Transferencia de calor y masa a través de la envolvente	34
2.1.7. Flujo del aire	37
	iii

2.1.8.	Fuentes internas de calor y humedad	38
2.1.9.	Sistema de calefacción, ventilación y acondicionamiento del aire	39
2.2.	CONCEPTOS BIOCLIMÁTICOS Y AMBIENTALES	40
2.2.1.	Termorregulación humana	40
2.2.2.	Arquitectura bioclimática	41
2.2.3.	Arquitectura sostenible.....	44
2.3.	MÉTODOS DE MODELADO DE VIVIENDAS	46
2.3.1.	Balance de energía para el aire dentro de una vivienda.....	46
2.4.	MODELOS ADOPTADOS PARA OBTENER EL DESEMPEÑO TÉRMICO EN EDIFICACIONES	49
2.5.	BALANCE DE CALOR EN EL AIRE DE LA ZONA TÉRMICA	50
2.5.1.	Infiltraciones.....	52
2.6.	BALANCE DE CALOR EN LAS SUPERFICIES EXTERIORES	52
2.6.1.	Radiación de onda corta en superficies exteriores	53
2.6.2.	Radiación de onda larga en superficies exteriores	55
2.6.3.	Convección en superficies exteriores	59
2.7.	BALANCE DE CALOR EN LAS SUPERFICIES INTERIORES.....	59
2.7.1.	Irradiación solar incidente sobre superficies interiores	60
2.7.2.	Radiación debida a sistemas de iluminación y otras fuentes internas	61
2.8.	SIMULACIÓN ENERGÉTICA	62
2.8.1.	Simulador energético Energy Plus	63
2.8.2.	Interfaz de trabajo con Energy Plus	64
2.8.3.	Elaboración del Archivo de Entrada para el modelado de la vivienda altoandina en Energy Plus.....	66
CAPÍTULO III		
METODOLOGÍA		
3.1.	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	72
3.1.1.	Tipo de investigación	72
3.1.2.	Diseño de investigación	72
3.2.	TÉCNICAS Y ESTRATEGIAS	80
3.2.1.	Técnica	80
3.2.2.	Estrategias	80
CAPÍTULO IV		81
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		81

4.1. INTRODUCCIÓN	81
4.2. DIAGNÓSTICO TÉRMICO A ESTUDIAR	82
4.2.1. Condiciones climáticas ambientales en lugar de estudio.....	82
4.2.2. Condiciones térmicas Interiores de la vivienda típica altoandina diagnosticada, vivienda solar construida y la validación del modelo con programa Energy Plus.....	84
Simulación térmica y correlativa	86
4.3. SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS DEL MODELO DE LA VIVIENDA ALTOANDINA SOSTENIBLE EN EL PROGRAMA ENERGY PLUS	87
4.3.1. Desempeño térmico de la vivienda altoandina simulada	90
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	102



ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Caracterización térmica en paredes, coberturas y ventanas para los edificios analizados en Lisboa Portugal. Y la variación en el diseño según las décadas.....	15
2. Elementos constructivos que son empleados en el modelo final para la simulación..	78
3. Transmitancias térmicas por componentes de la envolvente.....	88



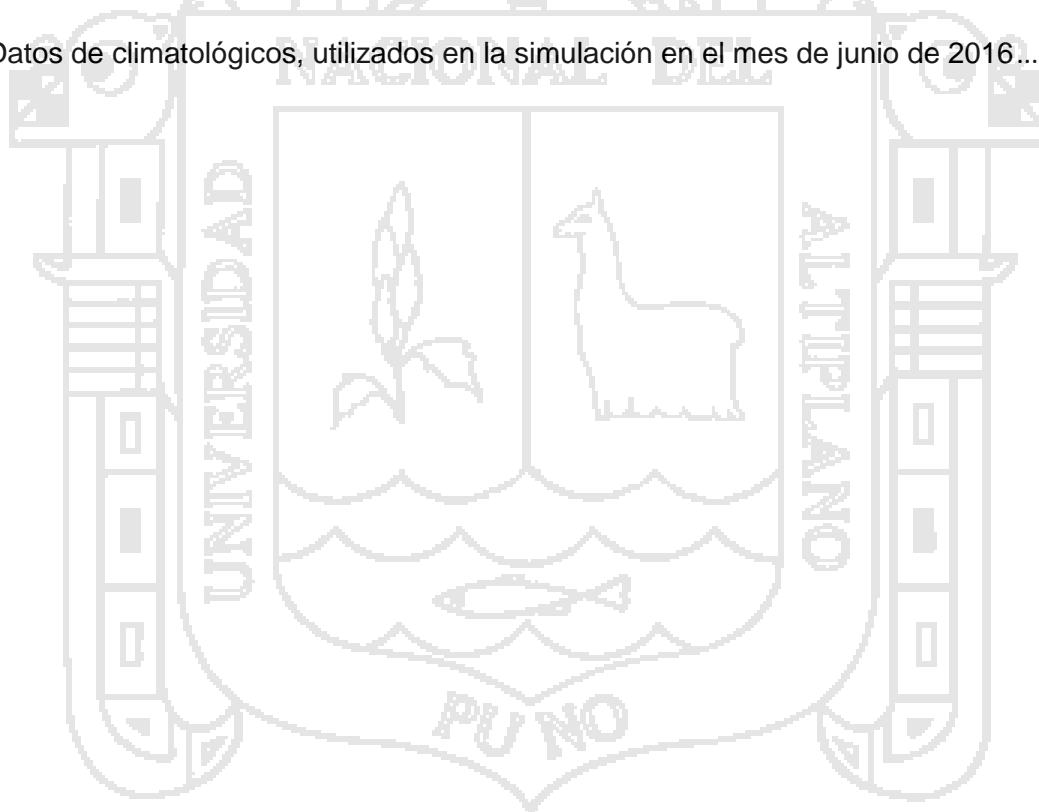
ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Transferencia de calor en el estado constante a través de una pared compuesta.	20
2. Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie.....	21
3. Intercambio de radiación, (a) en la superficie y (b) entre una superficie y sus alrededores.	26
4. Componentes de la irradiación solar	28
5. Factores que influyen en las condiciones ambientales en el interior de los edificios	32
6. Principales procesos que afectan la transferencia de calor y masa a través de la envolvente.	35
7. Balance de calor en las superficies exteriores.	53
8. Balance de calor en las superficies interiores.	60
9. EP- Launch.	65
10. Interfaz inicial del programa IDF editor: Energy Plus v8.4.0.....	66
11. Captura de los parámetros de simulación de la vivienda altoandina en idf editor. .	67
12. Parámetros de simulación “versión”.....	67
13. Parámetros de simulación “simulation control”.	68
14. Parámetros de simulación “localización de lugar”.	68
15. Parámetros de simulación “localización de lugar”.	68
16. Ejemplos de materiales opacos empleados en la construcción de la vivienda en IDF Editor.	69
17. Tipos de acristalamientos en la vivienda y sus características térmicas.....	70
18. Ejemplos de compuestos para construir paredes a partir de capas de materiales.	70
19. Parámetros de los detalle de las superficies del edificio.	71
20. Parámetros de los detalle de las subsuperficies de la vivienda.	71
21. Parámetro de variable de salida.	71
22. Metodología de la simulación en programa Sketchup, Open Studio y Energy Plus.	76

23. El proceso de simulación de la vivienda.	78
24. Condiciones climáticas en las zonas altoandinas de llave y en mazo cruz en los meses de junio a octubre del año 2016.	83
25. La radiación solar en la ciudad de puno a 3809 m.s.n.m. en la época de invierno del año 2016.	83
26. Comparación de resultados de temperatura simulado (modelo final) y medido (vivienda construida) y la correlación correspondiente.....	86
27. Vista del modelo final de la vivienda altoandina generadas en el entorno gráfico google Sketchup.....	87
28. Temperaturas (°c) simuladas y medidas para el aire del ambiente de la vivienda altoandina sostenible en el mes de junio de 2016.....	91
29. Humedad relativa HR (%) simulada y medido del aire del ambiente de la vivienda altoandina sostenible en el mes de junio de 2016.....	91
30. Temperatura simulada en las superficies internas y externas de las paredes de la vivienda altoandina.	92
31. Temperaturas simuladas en las superficies internas y externas de puertas y ventanas de la vivienda altoandina sostenible.....	92
32. Temperatura simulada en las superficies internas y externas en el techo de la vivienda altoandina sostenible.....	92

ÍNDICE DE ANEXO

	Pág.
1. Dimensiones de la vivienda altoandina sostenible propuesta simulada.....	103
2. Configuración de la envolvente considerada para la simulación de la vivienda	104
3. Creación de la geometría de la vivienda altoandina sostenible (edición de superficies y subsuperficies) en: Sketchup-Legacy, Oopen Studio.....	104
4. Entradas de datos en IDF Editor, visto en fichero Text Output Files	105
5. Registro de temperaturas máximas y mínimas en los meses de junio, julio y agosto de año 2016 en Ilave y en Mazo cruz.....	114
6. Datos de climatológicos, utilizados en la simulación en el mes de junio de 2016.....	115



RESUMEN

La investigación, tuvo como objetivo determinar el desempeño térmico basado en método de balance de energía y lograr que la temperatura en el interior de la vivienda altoandina sea cálido y sostenible, mediante el uso del programa de simulación energético Energy Plus, haciendo énfasis en modelos matemáticos de la evaluación en los procesos de transferencia de calor. Una vivienda sostenible es un sistema complejo que interactúa con el medio ambiente y es térmicamente dependiente de aspectos arquitectónicos (propiedades termofísicas y ópticas). La investigación es de tipo aplicada de nivel analítico de diseño descriptivo cuasi experimental. Se realizó el análisis de la simulación del desempeño térmico de la vivienda altoandina sostenible propuesta, obteniendo la temperatura de la zona térmica en promedio mínimas y promedios máximos de 11°C y 17.7°C respectivamente, para una temperatura promedio mínima exterior de 2.23°C. Estos resultados contribuyen alcanzar un ambiente cálido en el interior de la vivienda, traduciéndose en una satisfacción y mejor calidad de vida saludable para el poblador rural altoandina.

Palabras Claves: desempeño, modelo matemático, simulación energética, sostenible y térmica.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the thermal performance based on the energy balance method and make the temperature inside the high-altitude housing warm and sustainable, through the use of the energy simulation program Energy Plus, emphasizing mathematical models of evaluation in heat transfer processes. A sustainable home is a complex system that interacts with the environment and is thermally dependent on architectural aspects (thermophysical and optical properties). The investigation is of applied type of analytical level of quasi experimental descriptive design. The analysis of the thermal performance simulation of the proposed high-altitude housing project was carried out, obtaining the temperature of the thermal zone on average minimum and maximum averages of 11°C and 17.7°C respectively, for an average minimum external temperature of 2.23°C. These results contribute to reaching a warm environment inside the house, translating into a satisfaction and a better quality of healthy life for the high Andean rural population.

Keywords: energy simulation, mathematical model, performance, sustainable and thermal.

INTRODUCCIÓN

La zona altiplánica de la región de Puno así como la región altoandina peruana sufren de un serio problema de vivienda en la temporada de invierno, y las familias son sometidos a condiciones climáticas frías extremas; entendido éste como la carencia que experimenta una familia de una zona rural de un lugar adecuado donde habitar. La población afectada a nivel nacional en el periodo de 2011 a 2015 llega a 1'558,617 pobladores, y siendo la región de Puno con mayor cantidad de 553 613 pobladores afectadas, según datos de emergencias que fueron registrados en el sistema SINPAD, (Indeci). Una de las causa asociadas a esta terrible estadística es básicamente el uso de las técnicas constructivas (las propiedades termofísicas de los materiales constructivas) en viviendas que con el correr de los años han devenido al menos (Flores, 2014).

La calidad de vida debe entenderse a partir de las necesidades y bienestar, dentro de las primeras, catalogada como necesidad social se ubica la vivienda, misma que se incorpora dentro de los servicios públicos destinados al desarrollo social; para argumentar que la vivienda y varias de sus dimensiones impactan la calidad de vida.

Al diseñar viviendas, las condiciones climáticas se consideran a un nivel práctico y no se profundiza en la eficiencia que el diseño pueda desarrollar para contrarrestar efectos negativos ambientales. Al respecto, (Olgyay, 2002) dice: "El proceso lógico sería trabajar con las fuerzas de la naturaleza y no en contra de ellas, aprovechando sus potencialidades para crear unas condiciones de vida adecuadas".

El desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Llevando el término sustentabilidad al desarrollo de viviendas, es posible definir que una vivienda sostenible es aquella construida “buscando aprovechar los recursos naturales de tal modo que se minimice el impacto ambiental de la construcción sobre el ambiente natural y los habitantes”.

Pero se debe aclarar que la construcción sostenible no significa edificar casas de madera ni usar materiales reciclados; sino ofrecer una propuesta integral que favorezca el equilibrio ecológico, la responsabilidad social y la eficiencia económica, para brindar la vida a los futuros habitantes.

El aprovechamiento de recursos naturales de cada región, sin implicar su degradación, contribuye a una vida más confortable y armónica, y cuando se combina con una necesidad básica de la sociedad, como lo es la vivienda, el aporte a la vida cotidiana y, por lo tanto, al desarrollo, se vuelve significativo, pues contribuye al aspecto económico: reduciendo costos y demanda de servicios, y al cultural: evitando la pérdida de respeto por el medio ambiente y creando un espacio más agradable para ser habitado.

En el Perú no se ha tocado con profundidad el tema de eficiencia energética en edificaciones, así tampoco el tema de bioclimatización de viviendas o viviendas sostenibles en zonas rurales altoandinas; es así, bajo el marco de desarrollo de la Red Iberoamericana para el uso de las Energías Renovables y diseño bioclimático

en viviendas y edificios de interés social del CYTED, coordinada por el Dr. Helder Goncalvez del INETI de Portugal, se comprobó que en el Perú no se ha tratado sistemáticamente la problemática del clima extremadamente adverso en altitudes mayores a 3000 m.s.n.m.

A continuación se describe la estructura de los contenidos por capítulos:

En el CAPÍTULO I, se define el problema, se formulan las interrogantes, se establece los objetivos, hipótesis, justificación, así mismo se muestra la importancia y los antecedentes de la investigación.

En el CAPÍTULO II, se desarrolla el marco teórico en el que se detallan los conceptos, definiciones, ecuaciones empíricas y los diferentes modelos matemáticos de simulación energética y el procedimiento de simulación energética, que utilizan para el desarrollo de esta investigación.

Luego, CAPÍTULO III; se presenta la metodología utilizada en el presente proyecto de investigación.

Finalmente en el CAPÍTULO IV; se presenta los resultados, discusiones y análisis, es decir se comprobó que con la metodología de la simulación del desempeño de la vivienda diseñada es confortable. La investigación termina con conclusiones, recomendaciones, bibliografía y con anexos.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Uno de los principales problemas que sufren actualmente las viviendas altoandinas del país es la eficiencia de los sistemas de calefacción en época de invierno, los estudios muestran que para mantener una vivienda que pueda aislar correctamente el frío, constituye un aspecto importante para la población (Flores, 2014). En la actualidad, la reglamentación térmica permite mejorar las condiciones de viviendas nuevas, por medio de la exigencia de un estándar base, según el enfoque adaptativo de confort térmico y de acuerdo con los requerimientos de la (ISO 10551,1995). Otro de los problemas identificados en la Región de Puno es la falta de utilización de herramientas de simulación energética.

Las herramientas de simulación energética sirven progresivamente para análisis de la función de energía de las viviendas y la comodidad termal de sus ocupantes, para

predecir el desempeño térmico de las viviendas que puedan usarse en paralelo al diseño de los mismos, (Vera, 2002).

En las zonas altas de la provincia de El Collao ubicadas entre 4,000 metros sobre el nivel del mar, cuentan con clima frígido (muy frío en la temporada de invierno), y su población soporta las temperaturas mínimas de -16.0 grados (Senamhi, 2016). Esto ocasiona problemas de falta de confort térmico al interior de las viviendas que se encuentran en estas zonas altas de la región de Puno. Las consecuencias que genera vivir en ambientes extremadamente fríos son: problemas de salud, mortandad por enfermedades respiratorias, restricción de actividades nocturnas.

1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La habitabilidad de las edificaciones puede ser definida como su capacidad para proveer un ambiente cálido, en términos de bienestar térmico. El bienestar térmico es fundamental para proveer un ambiente cálido, diversos estudios definen una zona térmica cálida en la cual el 80% de la población presenta una sensación psicológica de agrado con el ambiente, (Vera, 2002).

Una edificación es un sistema complejo que interactúa con el medio ambiente y es térmicamente dependiente de su geometría (forma), orientación, materiales de construcción (propiedades termofísicas y ópticas), y la habitabilidad (personas, equipo, fuentes de calor, iluminación, etc.), (Flores. 2014). Por lo tanto, es común el uso de herramientas computacionales para simular el comportamiento térmico de edificaciones sobre estudios experimentales que involucran una mayor inversión económica y de tiempo.

La forma de simular el comportamiento térmico de una habitación se basa en el uso de modelos matemáticos detallados que resuelven todo el campo de flujo o modelos que simulan sistemas de gran escala con el uso del método de balances globales de energía. Los estudios numéricos detallados, modelan matemáticamente una habitación como una cavidad y tienen la ventaja de poder manipular los componentes y propiedades de la habitación para predecir lo que ocurrirá en el sistema.

Bajo esta perspectiva, es vital alcanzar los niveles de condición cálida en las viviendas que se ubican en las zonas altas, requerido por sus habitantes y en su caso, hacer recomendaciones arquitectónicas dirigidas a mejorar los niveles de condición de bienestar higrotérmico en los diseños de nuevas viviendas altoandinas más eficientes en el uso de la energía solar en la sustentabilidad de los edificaciones. Es en este contexto que se hace necesario el estudio de la simulación energética para determinar el desempeño térmico en viviendas. Es por tales motivos que, con este trabajo se desea contribuir como una alternativa de mejorar la temperatura dentro de la vivienda y que logren una temperatura cálida, aprovechando el uso eficiente de la energía solar, para así mejorar la calidad de vida de los pobladores de las zonas en condición de pobreza y que son altamente vulnerables a los fenómenos naturales.

1.3. PREGUNTAS DEL PROBLEMA

1.3.1. Enunciado General

¿Cómo determinar el desempeño térmico de una habitación altoandina sostenible con climatización pasiva, mediante el programa de simulación energética?

1.3.2. Enunciados específicos

1. ¿Cuál es el método de modelado utilizado para el cálculo del desempeño térmico en viviendas altoandinas sostenibles?
2. ¿Qué modelos matemáticos para el uso de la simulación energética permiten obtener el desempeño térmico en viviendas altoandinas sostenibles?
3. ¿Qué factores de carácter pasivo contribuyen en la mejora de la eficiencia energética de las viviendas altoandinas sostenibles, teniendo en cuenta las condiciones climáticas críticas, para mejorar la calidad de vida a los pobladores que radican en las zonas altas de la provincia de El Collao?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Simular el desempeño térmico en viviendas altoandinas sostenibles con climatización pasiva en la provincia de “El Collao”.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Utilizar el método de modelado para el cálculo del desempeño térmico en vivienda altoandina sostenible.
2. Desarrollar el modelo matemático para el uso de simulación energética que contribuye en obtener el desempeño térmico en viviendas sostenibles.
3. Proponer recomendaciones para el diseño energético de nuevas viviendas sostenibles para proporcionar la mejor calidad de vida a los pobladores altoandinos y uso eficiente de los recursos energéticos para la zona altoandina de El Collao.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis General

Con un correcto tratamiento de medidas pasivas y técnicas de eficiencia energética, se logra un buen desempeño térmico, mediante el programa de simulación energética en las viviendas altoandinas de la provincia de El Collao

1.5.2. Hipótesis Específicos

1. El Con el uso del método de Balance de Energía en el programa de simulación energética Energy Plus, se logró obtener mejores resultados de desempeño térmico de las viviendas altoandinas sostenibles.
2. La forma de simular el desempeño térmico de la vivienda sostenible es basado en modelos detallados que resuelven todo campo de flujo de energía a gran escala.

3. Con un aspecto arquitectónico de diseño adecuado de las viviendas sostenibles, permite un mejor aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía de calefacción, y es un beneficio económico para los pobladores de la zona altoandina de El Collao.

1.6. ANTECEDENTES

En este ámbito; Vera y Ordenes (2002). Presenta que, un objetivo fundamental al diseñar un espacio habitable, es asegurar el bienestar térmico de sus ocupantes, con una demanda energética compatible con las actividades desarrolladas al interior del mismo. En Chile, la vivienda social no cumple con este objetivo, debido a: (1) las viviendas no son diseñadas teniendo en mente este objetivo; (2) un alto porcentaje de las viviendas tiene superficie reducida (menor a 50 m²) con una alta tasa de ocupación; (3) los materiales componentes de la envolvente térmica (muros, pisos, techumbre y ventanas) presentan baja capacidad de aislación térmica; (4) la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción no exige requerimientos de aislación térmica de los elementos de la envolvente, excepto para el complejo techumbre a partir del año 2000. Esto produce un desmejoramiento de la calidad de vida de los usuarios, y el uso ineficiente de los recursos energéticos para la climatización de las viviendas. El objetivo de la investigación fue evaluar el efecto sobre las cargas de calefacción y refrigeración de diferentes estrategias pasivas de control térmico, tales como aislación térmica, orientación y tamaño de las superficies vidriadas, y calefacción solar pasiva con el propósito de establecer recomendaciones para el diseño de viviendas sociales en Santiago, Concepción y

Punta Arenas (climas con estación fría y/o cálida prolongada). Para este propósito se utilizó un programa de simulación de energía en edificios, llamado Power DOE. Los principales resultados muestran importantes cargas de calefacción y refrigeración de las viviendas sin estrategias de control térmico (entre 111 y 370 kWh/año·m² para calefacción y 76 kWh/año·m² para refrigeración). Por consiguiente, las condiciones de bienestar térmico no son logradas. Por otro lado, aplicando en forma conjunta las estrategias de control térmico se observan reducciones importantes de las cargas, superiores a 45 kWh/año·m² (40%) en Santiago, y 90 kWh/año·m² (24%) en Punta Arenas.

También Fernández (2012). Realizó una investigación que describe el diseño y el comportamiento energético de una vivienda unifamiliar de consumo casi nulo. Se toma como referencia de diseño el Estándar *Passivhaus*. El estándar alemán *Passivhauses* conocido por sus bajas exigencias energéticas que requieren baja demanda de calefacción y refrigeración principalmente. Además se analizan aspectos fundamentales a considerar en la etapa de diseño para conseguir un consumo eficiente de la energía. *Una vez definido el diseño definitivo de la vivienda, es necesario comprobar que éste es aceptable. Para ello se recurre a la simulación energética, siendo éste el método que proporciona resultados más reales. Esta simulación se realiza con el programa EnergyPlus (EP).* Finalmente, para comprobar la rentabilidad de la vivienda proyectada, se analiza y simula una vivienda de igual forma, pero cuyos cerramientos e instalaciones cumplen únicamente los criterios establecidos por el *Código Técnico de la Edificación (CTE)*.

Los resultados obtenidos demuestran que la vivienda pasiva es rentable en pocos años.

Maureen (2012) planteó que el desarrollo residencial en la zona centro-sur de Chile ha logrado cubrir las demandas habitacionales, fundamentalmente con viviendas aisladas en baja densidad, de tipologías y sistemas constructivos similares, aplicando una normativa térmica, inédita en Latinoamérica, pero poco exigente en relación a estándares internacionales, que logran una mayor reducción de la demanda energética. Además, las condiciones climáticas de la zona permitirían una considerable mejora de las prestaciones térmicas de los edificios si se consideraran algunas características tipológicas referidas a la agrupación, el soleamiento, la distribución de la masa térmica y las mejoras de la envolvente. Este apartado revisa características ambientales y morfológicas de las edificaciones residenciales en la zona, planteando recomendaciones de diseño y construcción que podrían aplicarse para promover viviendas más eficientes energéticamente.

Quesada (2014), realizó una comparación entre los métodos de evaluación de la edificación residencial, de mayor influencia a nivel internacional (BREEAM, LEED, VERDE, CASBEE y QUALITEL), para establecer bases que sirvan en futuros desarrollos. El artículo se estructura en tres partes: La primera, revisa el surgimiento y objetivos de los métodos; la segunda, presenta la metodología utilizada en el estudio; y una tercera, analiza y compara estos métodos. Se concluye estableciendo las dimensiones y categorías que abordan, además de la estructura metodológica, el sistema de calificación y los límites que poseen los métodos.

Herrera (2004) realizó una investigación de un estudio de campo para determinar la temperatura de confort de habitantes de viviendas de bajo costo en dos ciudades de clima cálido-seco al norte de México: Chihuahua y Ciudad Juárez, durante dos periodos: temporada de invierno (febrero) y temporada de verano (julio). El estudio de campo se realizó con el enfoque adaptativo de confort térmico y de acuerdo con los requerimientos de la ISO 10551. Cuyo objetivo fue evaluar este tipo de viviendas que ofrece el gobierno local y proponer recomendaciones para el diseño de nuevas viviendas. Los datos obtenidos en el estudio de campo se analizaron mediante el Método Intervalos de los Promedios de Sensación Térmica (IPST). En dicho trabajo se llega a las siguientes conclusiones: La tolerancia del clima interior indica que las personas consideran que sus casas están en mejores condiciones climáticas en invierno que en verano. Y entre las propuestas arquitectónicas complementarias para mejorar las condiciones del comportamiento térmico de las viviendas actuales, producto de esta investigación:

- La correcta orientación y dimensiones de las aberturas.
- Ampliar el espesor de muros con materiales con masa térmica.
- Aislamiento en cubiertas.
- Protección solar en ventanas.
- Mejorar la ventilación, por lo que puertas, paredes interiores y el diseño de las ventanas exteriores, debe mejorar.
- Mayor altura interior.

Espinoza, Saavedra y Huaylla, (2009), en su artículo plantearon la propuesta de modificación constructiva más adecuada para lograr incrementar la temperatura dentro de la vivienda. Llegando a las siguientes conclusiones en la vivienda modificada, los mínimos de temperatura del aire en el dormitorio 1 y en la cocina fueron, en promedio, 9°C y 11°C, respectivamente; esto implicó una elevación de las temperaturas mínimas (respecto al 2008) de 6°C (para el dormitorio1) y 8°C (para la cocina) aproximadamente. Se concluye que es posible elevar la temperatura del aire al interior de la vivienda rural altoandina desde condiciones infrahumanas (mínimos de 3°C) hasta condiciones adecuadas para el medio (mínimos de 11°C); usando para ello elementos constructivos adecuados y la energía solar como fuente de calentamiento.

Edificios bioclimáticos de construção social e edificios sociais em Portugal,

Si bien en Portugal (y en general en Europa) las condiciones de vida son mucho mejores que en Sudamérica y las condiciones climáticas no son tan parecidas a las de las zonas altoandinas; considero importante mencionar el caso de las edificaciones sociales en Lisboa debido a que, en el largo plazo, los problemas que afrontan estas edificaciones europeas las afrontarán (y en muchos casos ya afrontan) las edificaciones peruanas. A continuación se muestra un texto del estudio.

“La ciudad de Lisboa es un ejemplo vivo de las asimetrías existentes en Portugal, entre el litoral y el interior y el medio urbano y el medio rural. La inexistencia de condiciones de trabajo en el interior del país, desde la década de los sesenta ha

dato origen a un flujo de migraciones internas en dirección a las ciudades de litoral, en busca de mejores condiciones de vida. Los barrios sociales procuran por un lado garantizar condiciones de habitabilidad y por otro lado promover la integración de estas poblaciones. No obstante, la fisonomía de los barrios sociales comienza desde luego por obedecer a algunas particularidades, que se manifiestan a nivel de la localización, de las condiciones de salubridad, de la infraestructura involucrada y de la calidad de la arquitectura y materiales de construcción, aspectos que determinan a la partida un estigma discriminatorio a estos barrios y a las personas que en ellas habitan” (Gonçalves, 2004).

Portugal es uno de los países europeos más cálidos. La primavera y el verano son soleados y las temperaturas más altas durante julio y agosto son de entre 28°C a 35°C, a veces llegando a los 40°C en el interior del sur. El otoño e invierno son típicamente lluviosos y ventosos, aunque días soleados no son extraños. No son comunes las temperaturas menores a los 2°C en la zona costera, generalmente estando en un promedio de 8°C a 11°C. Como se menciona en el texto, la fuerte migración a las ciudades costeras implicó la construcción de edificios sociales (en los cuales cada departamento usualmente fue de 3 ó 4 habitaciones), observándose que en cada década se presentaba un cambio en el diseño de los nuevos edificios sociales; sin embargo, no se daba mucha importancia al aislamiento térmico o a las consideraciones bioclimáticas. Debido a las condiciones climáticas calurosas y frías y a las características térmicas de los materiales, el gasto energético en la aclimatación de este tipo de edificios ha sido y es considerable. Recién desde la década de los 90s empieza a verse algunas consideraciones bioclimáticas en la

concepción de los edificios sociales, todo esto logrado a través de la entrada en vigor del “Reglamento de las Características de Comportamiento Térmico de los Edificios”.

En la actualidad existe un reglamento que exige que las nuevas edificaciones sean bioclimáticas, esto con la finalidad de lograr edificios eficientes y, a largo plazo, lograr edificios de consumo cero; es decir, que los mismos edificios generen la misma energía que consumen. Para todo esto se ha implementado un sistema de certificación de edificios, siendo estos calificados desde niveles que van desde el A hasta el G.

Cuadro 1. Caracterización térmica en paredes, coberturas y ventanas para los edificios analizados en Lisboa Portugal. Y la variación en el diseño según las décadas.

Década	Paredes	U (W/m ² . °C)	Cobertura	U (W/m ² . °C)	Vanos envidriados	U (W/m ² . °C)
60	Ladrillo 22cm	1,6	Inclinada	2,9	Vidrio simple de 4mm	5,8
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	3,7
70	Ladrillo 22cm	1,6	Horizontal	3,9	Vidrio simple de 4mm	5,8
					Marco de vidrio con cortinas interiores de madera	4,2
80	Doble ladrillo 11 y 7 cm	1,5	Inclinada	3,3	Vidrio simple de 3mm	5,8
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	3,7
					Marco de vidrio con cortinas interiores de madera	4,2
90	Doble ladrillo 11 y 7 cm	1,5	Inclinada 5 cm aislamiento térmico	0,7	Vidrio simple de 4mm	5,8
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	4,2
2000	Doble ladrillo 11 y 15 cm	1,2	Inclinada 6 cm aislamiento térmico	0,6	Marco de vidrio con cortinas interiores de madera	4,8
					Vidrio simple de 6mm	5,7
					Marco de vidrio con persianas exteriores de madera	4,2

Fuente: (Gonçalves, 2004)

Donde **U** es transmitancia térmica equivalente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se introducen los fundamentos físicos y matemáticos necesarios para el desarrollo de esta investigación, como ambientales, propiedades termofísicas de los materiales, se definen la incidencia de los factores ambientales que alteran el comportamiento térmico al interior de una vivienda, la transmisión de calor y los principios básicos en los cuales se basan la investigación.

2.1. TRANSFERENCIAS DE CALOR Y MASA EN EDIFICIOS

La transferencia de calor es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones

especificadas (Welty, 1963). A continuación se explican los principios de los distintos mecanismos de transmitir el calor: por conducción, convección y radiación.

2.1.1. Conducción

Se considera *conducción* al modo de transferencia de energía desde las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia como resultado de las interacciones entre las partículas. El mecanismo físico de la conducción se encuentra asociado a las colisiones y la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. La conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases; en sólidos, es debida a las vibraciones de las moléculas y a la energía transportada por electrones libres (Incropera, 1999).

Es posible cuantificar el proceso de transferencia de calor por conducción empleando la ley de Fourier que fue establecida por primera vez, 1822 por el científico francés Joseph B. J. Fourier (Welty, 1963), en la siguiente forma:

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1.1)$$

Donde el flujo de calor por unidad de área q_x es la rapidez con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria y es perpendicular a la dirección del flujo de calor, y es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica.

Obsérvese que el calor se transfiere a través de conducción entre sólidos en contacto, o entre zonas de un mismo sólido cuando existen diferencias de temperatura entre ellas. En viviendas, se transmite por la materia constitutiva de la envolvente. Hay que conocer los valores de los diferentes materiales de la envolvente de la vivienda para cuantificar su conducción, ésta se hace a través de la conductancia y si consideramos el área de la envolvente además las capas de aire superficiales presentes en la vivienda, se usará la propiedad de transmitancia (Kreider, 1994).

2.1.2. Convección

Dentro del contexto del análisis térmico de viviendas, la convección se puede considerar como un proceso que ocurre entre superficies y el aire adyacente a estas. La transferencia de calor y masa por convección juega un papel importante en el análisis térmico de las viviendas ya que estos dos procesos afectan las condiciones de temperatura y contenido de humedad de las superficies de la envolvente, y por ende, modifica la transferencia de calor y masa a través de la propia envolvente, las condiciones de temperatura y humedad en el interior de la vivienda, y el consumo de los sistemas HVAC.

Es el mecanismo de transmisión de calor que se produce en un fluido debido al movimiento molecular aleatorio, denominado difusión o conducción, y al transporte de energía como consecuencia de los movimientos del fluido, producidos bien por medios artificiales o por las variaciones de densidad (G.K., 1967).

La *convección* de calor se compone de dos mecanismos: transferencia de calor debido al movimiento molecular aleatorio (es decir, la conducción) y transferencia de energía debido al movimiento macroscópico del fluido. La convección se encuentra estrechamente relacionada con las características del movimiento del fluido (Welty, 1963).

Fue originalmente propuesta por el científico británico Isaac Newton quién en el año 1701 expresó por primera vez la ecuación correspondiente a la rapidez de transferencia de calor convectivo, por lo que se le denomina *ecuación de Newton de la rapidez o ley de Newton de enfriamiento*, (Welty, 1963). Esta ecuación es:

$$\frac{q_c}{A} = h_c \Delta T = h_c (T_{\text{superficie}} - T_{\text{zona}}) \quad (2.1.2)$$

Donde, q_c es la rapidez de transferencia de calor convectivo, expresada en $[W]$, A es el área normal a la dirección de flujo de calor $[m^2]$, ΔT es la diferencia de temperatura que existe entre la superficie y el fluido, en $[K]$ y h_c es el coeficiente de transferencia de calor convectivo o *coeficiente pelicular*, expresado en $[W/m^2K]$.

La ecuación ($q_x = kA\Delta T/L$) guarda una semejanza con la ecuación de Newton de la rapidez:

$$q_x = h_c A \Delta T \quad (2.1.3)$$

Esta semejanza de forma se puede utilizar en un problema en el existan ambas clases de transferencia de energía.

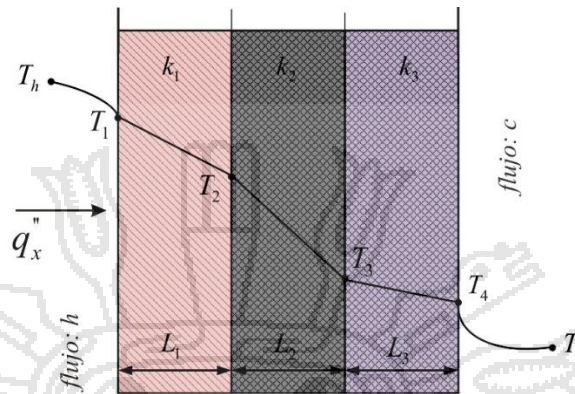


Figura 1. Transferencia de calor en el estado constante a través de una pared compuesta.

Fuente: (Welty, 1963)

Las superficies entre las que se intercambia calor y masa con el aire pueden ser: las superficies de la envolvente (paredes, techo y ventanas) o superficies que representen a las personas, a los electrodomésticos, a los muebles, entre otros.

Estudiando la pared plana compuesta, constituida con tres materiales en capas, cuyas dimensiones aparecen en la figura 1, se desea expresar la rapidez de transferencia de calor en estado permanente por unidad de área, entre un aire caliente que se encuentra a una temperatura T_h de un lado de la pared y un aire frío a una temperatura T_c del otro lado de pared (Welty, 1963).

Las relaciones de q_x que se dan a continuación, surgen de la aplicación de las ecuaciones: $q_x=kA\Delta T/L$ y $q_x=hA\Delta T$:

$$q_x = h_h A (T_h - T_1) = \frac{k_1 A}{L_1} (T_1 - T_2) = \frac{k_2 A}{L_2} (T_2 - T_3) = \frac{k_3 A}{L_3} (T_3 - T_4) = h_c A (T_4 - T_c) \quad (2.1.4)$$

Expresando cada una de las diferencias de temperatura de la ecuación anterior, y sumando estas ecuaciones, se obtiene:

$$T_h - T_c = q_x \left(\frac{1}{h_h A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A} + \frac{1}{h_c A} \right) \quad (2.1.5)$$

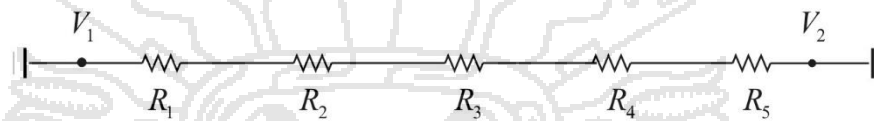


Figura 2. Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie.

Fuente: (Welty, 1963)

Y finalmente, resolviendo para q_x , note que la rapidez de transferencia de calor está expresada en términos de la diferencia total de la temperatura. Si se examina un circuito eléctrico en serie, de la figura 2, se puede escribir:

$$I = \frac{\Delta V}{\sum_i^5 R_i} \quad (2.1.6)$$

Usando las cantidades físicas análogas que aparecen en las expresiones correspondientes al flujo de calor entre el flujo de corriente eléctrica, y cada uno de los términos del denominador de la ecuación anterior se puede considerar como una resistencia térmica debida a convección o a conducción. Por lo tanto, la ecuación anterior se convierte en una transferencia de calor análoga a la ley de Ohm, que relaciona al flujo de calor con la diferencia total de temperatura dividido entre la resistencia térmica total entre los puntos cuyas

temperaturas son conocidas (Welty, 1963), la ecuación anterior se puede escribir sencillamente, en la forma:

$$q_x = \frac{\Delta T}{\sum_{i=1}^n R_{termica}} \quad (2.1.7)$$

Donde q_x es la transferencia de calor de un fluido a otro a través de una pared de área A . Cuando la diferencia de temperatura entre los fluidos es ΔT , entonces $\sum_{i=1}^n R$ representa la resistencia térmica total, y la resistencia unitaria total a la transferencia de calor es:

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} + \sum_{i=1}^n \frac{L}{k} \quad (2.1.8)$$

Donde $\sum 1/h$ es la suma de todas las resistencias peliculares en las superficies extremas, y $\sum L/k$ es la suma de todas las resistencias unitarias de los materiales de la pared. La resistencia unitaria total se representa por $1/U$. Y el recíproco de esta cantidad recibe el nombre de *transmitancia* U , o bien, de coeficiente total de transmisión de calor o coeficiente global de transferencia térmica. La ecuación de la transferencia de calor, se puede escribirse:

$$q_x = UA\Delta T \quad (2.1.9)$$

De aquí $U=q_x/A\Delta T$ es una forma comúnmente utilizada para expresar la rapidez de transferencia de calor para situaciones en las que aparezca un material compuesto o una combinación de mecanismo es la de definir el coeficiente total de transferencia de calor. Donde U es el coeficiente total de

transferencia de calor y tiene las mismas unidades que h_c , $[W/m^2K]$ (Welty, 1963).

Además, la ecuación para calcular coeficientes peliculares de transferencia de calor convectivo $W/m^2°C$ fue desarrollada por: Nusselt y Jurges (1922), Palyvos (2008) emite su modelo en forma simplificada en SI unidades (Reference, 2016):

$$h_c = 5.8 + 3.94v \quad (2.1.10)$$

$$h_i = \frac{h_c}{3} \quad (2.1.11)$$

Donde, v es la velocidad del viento en $[m/s]$ y h_c y h_i son coeficientes peliculares de transferencia de calor por convección $[m^2K/W]$. Estos modelos pueden ser aplicados a todas las superficies y lo relativamente constante y se asume a representación de la porción natural de convección de un coeficiente total de convección (Reference, 2016).

2.1.3. Radiación

La radiación es la energía en forma de onda electromagnética emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. A diferencia de la transferencia de calor por conducción y convección, la radiación no precisa un medio para transferirse.

En muchas aplicaciones (entre ellas el análisis térmico de edificios) la radiación se considera como un *fenómeno superficial*, es decir la radiación

emitida por las moléculas interiores de sólidos y líquidos es fuertemente absorbida por las moléculas contiguas. En consecuencia, la radiación emitida desde el interior no sale del volumen. De hecho, la energía emitida por el volumen se origina de moléculas que están a una distancia aproximada de 1 μm de la superficie (Incropera, 1999).

La radiación (E) que emite la materia limitada por una superficie o la rapidez de emisión de energía desde un radiador perfecto o cuerpo negro, está dada por la *ley de Stefan-Boltzmann* (Welty, 1963):

$$\frac{q}{A} = \sigma T_s^4 \quad (2.1.12)$$

Donde q es la rapidez de emisión de energía radiante en W; A es la área de la superficie emisora en m^2 ; T_s es la temperatura absoluta en K y σ es la constante *Stefan-Boltzmann*, cuyo valor es $5.672 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.

La constante de proporcionalidad que relaciona el flujo de energía radiante con la cuarta potencia de la temperatura absoluta tomó su nombre de Stefan quién, a partir de observaciones experimentales, propuso la ecuación en 1879 y de Boltzmann quién obtuvo esta relación, de manera teórica, en 1884. La ecuación anterior se conoce comúnmente como *ley de Stefan-Boltzmann de la radiación térmica*. Según esta ley, la potencia térmica q emitida por un cuerpo de área A cuya temperatura superficial es T está dada por (Welty, 1963):

$$q = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (2.1.13)$$

Donde ϵ es la *emisividad* de la superficie. La *emisividad* proporciona una medida de la eficiencia con la que una superficie emite energía en relación a un cuerpo negro. El valor de la emisividad tiene un rango de $0 \leq \epsilon \leq 1$, y depende del tipo de material de la superficie, del acabado y de la temperatura absoluta a la que se encuentre la superficie.

Ahora bien, considerando la transferencia de calor por radiación que se muestra en la figura 2.3a, una fracción de la irradiación que incide sobre la superficie será *absorbida* por esta, lo que incrementará la temperatura de dicha superficie, otra fracción será *reflejada* y otra será *emitida*. La irradiación absorbida I_{abs} se calcula mediante la siguiente ecuación (Welty, 1963):

$$I_{abs} = \alpha I \quad (2.1.14)$$

Donde α es la absorptividad de la superficie e I es la radiación que incide sobre la superficie. Esta ecuación implica que la temperatura de la superficie y la temperatura de la fuente de radiación son del mismo orden de magnitud, y que (por la ley de Kirchhoff) la absorptividad de la superficie es igual a la emisividad. Al igual que la emisividad, la absorptividad tiene un valor entre 0 y 1; un valor cercano a 0 indica que la mayoría de la irradiación es reflejada por la superficie. Otro concepto relacionado con la radiación es la radiosidad, la cual (como se muestra en la figura 3.a) es la suma de la radiación emitida y la irradiación reflejada por la superficie, en otras palabras es toda la energía radiante que sale de una superficie.

Cuando una superficie intercambia calor por radiación con sus alrededores (ver figura 3.b). La transferencia de calor intercambiada por radiación entre las superficies puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$q_{alr} = \varepsilon\sigma F_{s \rightarrow alr} (T_s^4 - T_{alr}^4) \tag{2.1.15}$$

Donde T_{alr} es la temperatura de los alrededores, $F_{s \rightarrow alr}$ es el factor de forma o factor visión entre la superficie y los alrededores. El factor de forma se define como la fracción de la radiación que sale de la superficie que es interceptada por la superficie, y depende de la forma geométrica y de la posición relativa entre superficies.

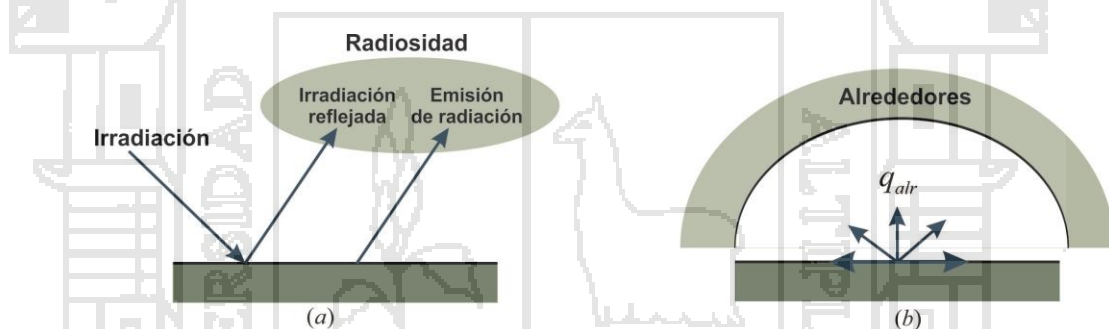


Figura 3. Intercambio de radiación, (a) en la superficie y (b) entre una superficie y sus alrededores.

Fuente: (Espinoza, 2012)

En el contexto del análisis térmico de edificios, en el intercambio de calor por radiación se distinguen dos tipos en función de la longitud de onda. La radiación solar y otros objetos que se encuentren a altas temperaturas, como los sistemas de iluminación, son fuentes de radiación de onda corta; mientras que elementos como otras superficies, personas, entre otros, intercambian

calor por radiación de onda larga (también llamada radiación térmica). En general, se puede considerar que los rayos gamma, los rayos X y los rayos ultravioleta (UV) son radiación de onda corta, y que la radiación que se extiende aproximadamente entre 0.1 y 100 μm , esto incluye parte de la radiación UV, todo el espectro visible, y el infrarrojo (IR) es radiación de onda larga (Incropera, 1999).

2.1.3.1. Radiación de onda corta

La fuente más importante de radiación de onda corta es el Sol, que en la mayoría de los edificios constituye la mayor ganancia de calor.

Visto desde la Tierra, el Sol actúa como una fuente puntual que ilumina a la Tierra, con rayos de radiación prácticamente paralelos. Al rayo cuasi-colimado que incide sobre lo alto de la atmosfera terrestre se le conoce como radiación solar extraterrestre.

Una vez que la radiación solar extraterrestre entra a la atmosfera de la Tierra una parte se ve absorbida y dispersada por los gases y partículas presentes en la atmosfera, otra parte se ve refleja hacia el exterior de la Tierra. La radiación que fue dispersada en la atmosfera produce la radiación solar difusa. Mientras que la radiación que permanece sin ser absorbida ni dispersada, y que aún permanece cuasi-colimada, constituye la radiación solar directa. En la figura 4, se muestra un esquema de las componentes de la irradiación solar total que incide sobre una superficie,

la cual es una combinación de la radiación solar directa, difusa y, la radiación que es reflejada por las superficies circundantes.

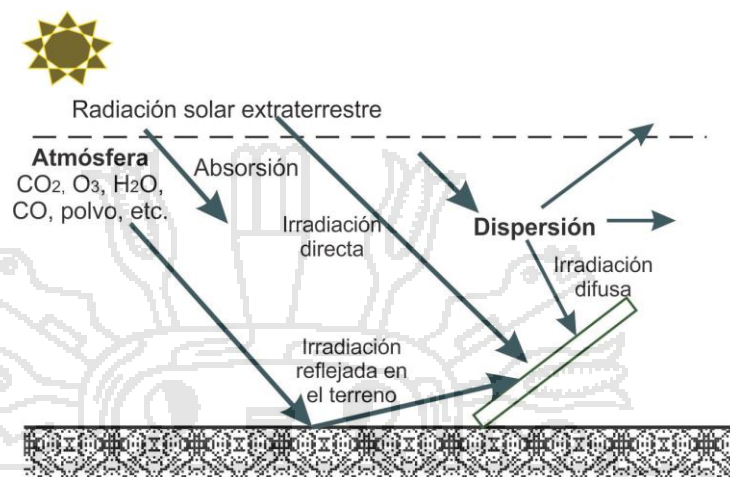


Figura 4. Componentes de la irradiación solar

Fuente: (Espinoza, 2012)

El movimiento aparente del Sol respecto a la Tierra, así como de las condiciones atmosféricas a lo largo del día produce cambios en la radiación solar total que incide sobre una superficie. La radiación solar que incide sobre una superficie opaca aumenta la temperatura de ésta, afectando la transferencia de calor por conducción y, por consiguiente, la temperatura en el interior del edificio.

2.1.3.2. Radiación de onda larga

El intercambio de calor de radiación por onda larga que se da entre las superficies del edificio (opacas o semitransparentes) y los alrededores como el cielo, los edificios circundantes y el suelo puede afectar considerablemente la temperatura de la superficie, en especial durante la

noche o en condiciones de cielo despejado, cuando la temperatura del cielo puede ser notablemente menor a la temperatura de las superficies exteriores del edificio. Esto incrementa de manera considerable la transferencia de calor. Otro aspecto importante relacionado con la radiación de onda larga es en el confort térmico. Si dentro del edificio se encuentran superficies a baja temperatura (ventanas), éstas podrían intercambiar calor con la piel humana y por ende afectar el confort térmico.

Como lo indica la ecuación anterior (la transferencia de calor intercambiada por radiación entre las superficies), es necesario conocer la temperatura de las superficies así como el factor de visión entre las superficies para poder calcular la transferencia de calor.

2.1.4. Conductividad térmica, Densidad, Calor específico y Resistencia térmica

La conductividad térmica es la propiedad física que nos indica la facilidad con que una sustancia puede realizar esta transmisión, es decir se puede considerar como una medida de la capacidad de los materiales para conducir calor, que expresa la cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo a través de una unidad de área y por unidad de espesor, con una diferencia de temperatura (ΔT). Se comprueba que la conductividad térmica de un material depende de la composición química de la sustancia o sustancias que lo componen y no de configuración geométrica. Un valor elevado de conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor

(metales, hormigones, entre otros); un valor bajo indica que es un pobre conductor de calor o aislante térmico (fibra de vidrio, polietileno, entre otros) (Chapman, 1974).

Examinemos la conducción de calor en estado permanente, a través de una pared plana cuyas superficies mantienen temperaturas constantes de T_1 (caliente) y T_2 (frio). Según la ecuación de Fourier la rapidez de transferencia de calor en la dirección de x , sujeta a las condiciones de frontera: $T = T_1$, en $x = 0$ y $T = T_2$, en $x = L$, se tiene:

$$q_x = \frac{kA}{L} (T_{1(\text{caliente})} - T_{2(\text{frio})}) = \frac{\Delta T}{L/Ak} \quad (2.1.16)$$

Otras propiedades importantes son la densidad ρ y el calor específico C_p . La *densidad* ρ es la cantidad de masa contenida en un volumen determinado y el *calor específico* define la cantidad de calor que debe ser suministrado a una unidad de masa para elevar su temperatura una unidad. El producto ρC_p es la *capacidad* del material para almacenar energía térmica.

La relación $\frac{L}{kA}$ de la ecuación de rapidez de transferencia de calor es equivalente a una resistencia térmica R , se define la oposición al paso del calor en la pared que presentan los elementos de construcción, la resistencia térmica R varía principalmente con la densidad del material, temperatura, humedad y el valor de R se puede calcular de la siguiente manera:

$$R = \frac{L}{kA} \quad (2.1.17)$$

Al recíproco de la resistencia térmica se le denomina conductancia térmica **C**, y se define como la cantidad de calor o energía transmitida a través de la unidad de área, es decir:

$$C = \frac{kA}{L} \quad (2.1.18)$$

Donde k/L (conductancia térmica por unidad de área) se llama *unidad de conductancia térmica para flujo de calor por conducción*, L es el espesor del material, k es la conductividad térmica y A es el área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor (Kreith, 1970).

2.1.5. Edificios como un sistema integral

Es razonable considerar que el principal objetivo de los edificios es proveer resguardo en un ambiente confortable para las personas que se encuentran dentro de éste. Como se ilustra en la figura, las condiciones ambientales en el interior del edificio son influenciadas por diversos factores. Los principales factores pueden identificarse como:

- Las condiciones ambientales exteriores.
- Características de la envolvente.
- Los ocupantes.
- Los sistemas auxiliares.

Siendo el edificio un sistema que se encuentra constantemente en contacto con el ambiente exterior, ambos intercambian energía en un sentido u otro

dependiendo de las condiciones que tienen cada uno en cada instante. Las condiciones ambientales exteriores que afectan al edificio pueden ser agrupadas en diversas variables meteorológicas. En el presente contexto las principales variables meteorológicas son la temperatura y humedad del aire, la radiación solar y la velocidad y dirección del viento. Por otra parte, la composición de la envolvente afecta de manera importante el comportamiento higrotérmico de esta, y por consiguiente a la cantidad de calor y masa que se transfiere hacia el ambiente interior del edificio. Ante una misma excitación, el comportamiento de un muro frente a otro será distinto si ambos difieren en su composición.

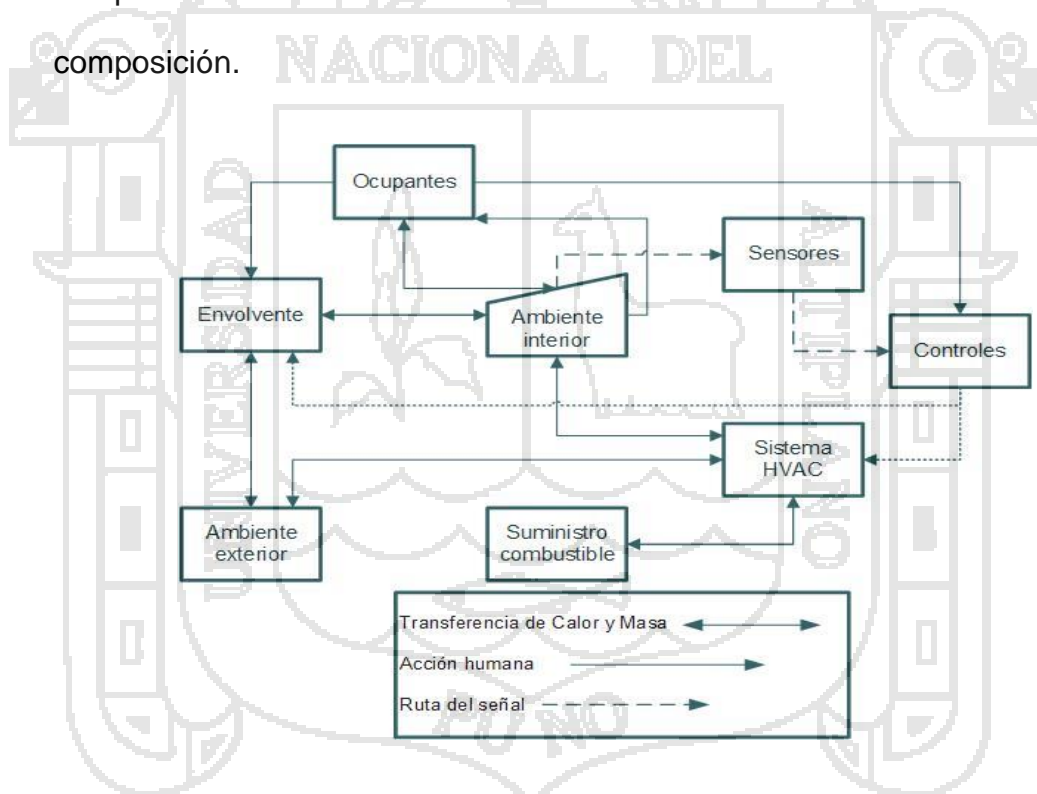


Figura 5. Factores que influyen en las condiciones ambientales en el interior de los edificios.

Fuente: (Hensen, 1991)

Además, los ocupantes del edificio pueden causar ganancias de calor sensible y latente hacia el ambiente interior, ya sea por su metabolismo o por el uso de aparatos electrodomésticos, estufas, computadoras, u otros. Adicionalmente, el ambiente interior puede ser controlado por los ocupantes por dos mecanismos. El primero es modificando los elementos de la envolvente, por ejemplo, abriendo o cerrando puertas, ventanas o cortinas. El segundo es programando o ajustando el funcionamiento de los dispositivos que controlan a los sistemas de HVAC (Reference, 2016).

Los sistemas auxiliares que desempeñan tareas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire (es decir, los sistemas HVAC, por sus siglas en inglés) también afectan el ambiente interior en el edificio.

Estos factores actúan sobre el ambiente interior del edificio a través de diversos mecanismos de transferencia de calor y masa. Los mecanismos principales son:

- Difusión de calor y masa a través de la envolvente y particiones.
- Convección de calor y masa entre el aire y las superficies.
- Radiación de calor en forma de radiación de onda corta o larga.
- Flujo de aire a través de la envolvente y de los sistemas de HVAC.

Todos estos flujos de calor y masa interactúan entre sí de manera dinámica, y determinan el comportamiento térmico del edificio. Para comprender y analizar el comportamiento térmico de un edificio se debe de considerar a éste como

un sistema integral y dinámico compuesto por diversos mecanismos de transferencia de calor y masa.

En las siguientes secciones se describen por separado cada uno de los diferentes mecanismos de transferencia de calor y masa en edificios y los factores importantes que los afectan.

2.1.6. Transferencia de calor y masa a través de la envolvente

La envolvente de los edificios incluye los techos, suelos, paredes y puertas, y sirve como una barrera física que separa las condiciones ambientales del exterior y del interior del mismo. Las superficies exteriores e interiores de la envolvente están constantemente expuestas a los cambios de las condiciones ambientales externas e internas. De las variaciones ambientales se derivan cambios en la temperatura, humedad y presión de aire entre las superficies exteriores e interiores de la envolvente.

Dichas condiciones ambientales cambian con el tiempo, además, los materiales de la envolvente tienen la capacidad de almacenar calor y humedad. Esto provoca que la transferencia de calor y masa a través de los materiales de la envolvente adquiera un carácter transitorio.

La diferencia de temperatura, humedad y presión del aire entre las superficies exteriores e interiores son los potenciales de impulso de la transferencia de calor y masa a través de la envolvente. En la figura 6, se ilustran los principales procesos que afectan a dichos potenciales de impulso.

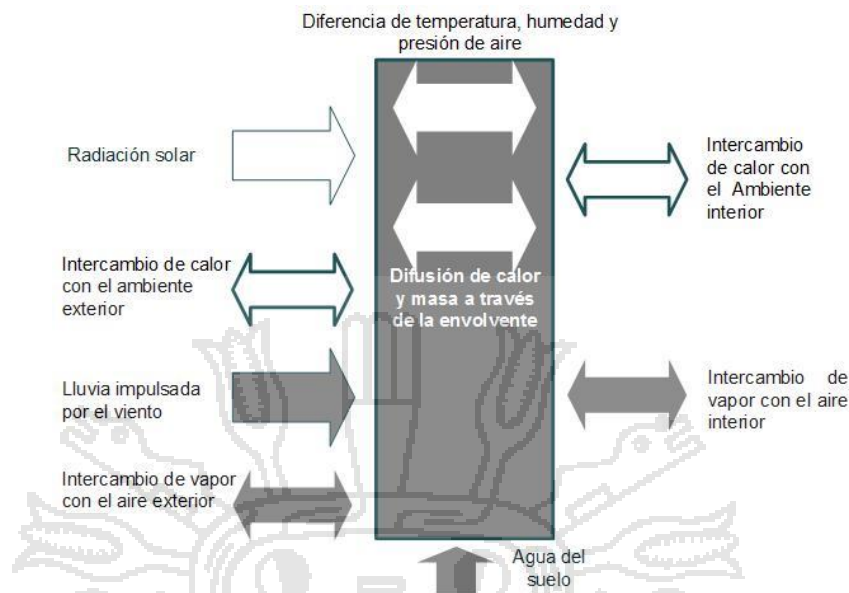


Figura 6. Principales procesos que afectan la transferencia de calor y masa a través de la envolvente.

Fuente: (Reference, 2016)

La radiación solar que incide sobre la superficie exterior eleva la temperatura de esta, con lo cual se incrementa la diferencia de temperatura entre superficies y en consecuencia la transferencia de calor hacia el interior. Con respecto a la humedad en la superficie, la radiación solar usualmente actúa como un método de secado para la superficie, sin embargo, en ocasiones (cuando la superficies esta mojada) la radiación puede elevar la presión del vapor causando que el vapor se difunda en ambas direcciones, el exterior y el interior de la envolvente, lo cual puede modificar el desempeño térmico y el deterioro de la envolvente.

El intercambio de calor de la superficie con el ambiente exterior e interior sucede principalmente por convección y por radiación de onda larga.

Típicamente ambos procesos tienen el efecto de enfriar las superficies, ya sea por intercambiar calor por radiación de onda larga con la atmósfera y los alrededores o por intercambiar calor por convección con el aire.

La lluvia (especialmente la lluvia que es impulsada de manera horizontal por el viento) es una de las contribuciones más importantes de la humedad total que entra a través de la envolvente del edificio (Blocken, 2000). Otra contribución de humedad se puede dar por los efectos de capilaridad que suceden en la envolvente, por ejemplo, esta puede absorber agua del suelo.

Las superficies expuestas de la envolvente intercambian vapor de agua y aire con el ambiente, principalmente a través de las grietas e imperfecciones de la envolvente.

Por lo anterior, un análisis riguroso de los procesos físicos que ocurren dentro de la envolvente considera a esta como un medio poroso y examina de manera acoplada la transferencia de calor y masa (Galbraith, 2001). Se deben considerar los cambios de fase, la difusión de humedad y los efectos capilares en los poros de la envolvente (Dos Santos, 2009), incluso para algunos materiales los efectos de la radiación entre las superficies de los poros pueden ser importante (Mohiuddin Syed, 2007). Cabe mencionar que la magnitud de estos transportes de energía y masa están en función de las propiedades higrotérmicas (es decir densidad, calor específico, conductividad térmica, permeabilidad, retención de agua y difusión de vapor) de los materiales que componen a la envolvente.

Los procesos de transferencia de calor y masa a través de la envolvente impactan las condiciones de temperatura, humedad y calidad del aire interior del edificio, así como el consumo de energía de los sistemas de calefacción y de aire acondicionado. La transmisión de humedad también está relacionada con el crecimiento de, así como al agrietamiento, degradación y modificación de las propiedades de los materiales de la envolvente.

El estudio de la transferencia de calor y masa a través de la envolvente de los edificios es una línea de investigación que sigue en desarrollo. De acuerdo a (Woloszyn, 2008), el reto actual es asegurar un buen balance entre los diferentes fenómenos físicos que interactúan, más que desarrollar modelos que se enfoquen en un solo fenómeno.

2.1.7. Flujo del aire

Dentro de los edificios se pueden considerar cuatro tipos de flujos de aire predominantes: *el flujo de aire que existe entre las diferentes zonas del edificio, infiltraciones, la ventilación natural y la ventilación mecánica.*

La infiltración es el flujo de aire que se traslada a través de grietas que se pueden encontrar alrededor de puertas y ventanas, o través de los mismos elementos de la envolvente. El flujo de aire entre las diferentes zonas del edificio, así como las infiltraciones, son causadas por la diferencia de la presión entre las zonas o entre el interior y exterior del edificio, según sea el caso.

Por otro lado, se considera ventilación natural al flujo de aire que ingresa intencionalmente a través de ventanas u otras aberturas en la envolvente. La ventilación mecánica es el flujo de aire suministrado deliberadamente para satisfacer los requerimientos de aire fresco y, en algunas ocasiones, para enfriar o calentar el aire interior del edificio.

La operación de apertura y cierre de ventanas y puertas, los cambios en la velocidad y dirección del viento, y el uso intermitente de la ventilación mecánica influyen los niveles de infiltración y el flujo de aire entre zonas.

2.1.8. Fuentes internas de calor y humedad

Las fuentes internas de calor y humedad en los edificios son muy diversas, algunos ejemplos son la iluminación, el refrigerador, la cocina, los equipos electrónicos, las personas, entre otros. Usualmente, la ganancia debida a las fuentes internas de calor y humedad se divide en calor sensible, latente y radiante. El calor sensible se añade directamente al aire por conducción y convección afectando la temperatura de la zona. Por otro lado, el calor latente ocurre cuando se añade humedad al aire de la zona (ej. el vapor emitido por personas o equipos). En contraste, el calor radiante primeramente es absorbido por las superficies de la envolvente y objetos de la zona y después es transferido por conducción y convección.

2.1.9. Sistema de calefacción, ventilación y acondicionamiento del aire

Los sistemas de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire, conocidos como sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*, por sus siglas en inglés), tienen como principales funciones el calentamiento, enfriamiento, ventilación, humidificación y des-humidificación del aire en el interior de los edificios, con el objeto de mantener condiciones de confort.

Existe una gran variedad de sistemas de HVAC, por ejemplo, los sistemas centralizados que distribuyen calefacción, enfriamiento y ventilación a múltiples zonas de edificios o sistemas descentralizados para zonas pequeñas o medianas. Tienen aplicación en todo tipo de edificios como las oficinas, departamentos, escuelas, hoteles, hospitales, entre otros.

Los sistemas HVAC están compuestos por una gran variedad de elementos que incluyen intercambiadores de calor, serpentines de calentamiento o enfriamiento, humidificadores, cámaras de mezclado, boilers, chimeneas, abanicos, bombas, motores, compresores, colectores solares, sistemas de tuberías, sistemas de ductos, sistemas de control, tanques de almacenamiento, entre otros. Todos estos componentes afectan el comportamiento térmico del edificio y el desempeño de los sistemas HVAC.

2.2. CONCEPTOS BIOCLIMÁTICOS Y AMBIENTALES

2.2.1. Termorregulación humana

El principal propósito del sistema de calefacción es proveer confort térmico en las habitaciones. Es por ello que antes de definir y diseñar dichos sistemas habrá que tener una idea clara de lo que implica el concepto de confort térmico. La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Aire Acondicionado y Refrigeración (ASHRAE, 2012) y la norma ISO 7730 lo define *confort térmico como aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico*.

Por lo tanto confort térmico puede definirse como el rango de las condiciones del entorno consideradas aceptables dentro de un espacio habitable, en el que el ser humano desarrolla sus actividades. El confort térmico es el resultado de una serie de factores físico ambientales, los cuales pueden actuar en forma individual o en combinación de ellos. El comportamiento térmico al interior de una vivienda dependerá de la incidencia de factores físico ambientales como (Nacif Hartley, 2011):

- Variables relacionadas con el clima de la región (sistemas convectivos, temperatura ambiente, temperatura interior, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento).
- Variables relacionadas con las características de los materiales de construcción (conductividad, capacidad térmica, densidad, calor específico).

- Variables relacionadas a constantes de cálculo (Stefan-Boltzmann, Factores de Conversión, Coeficiente de Convección).
- Variables relacionadas con la pérdida de calor en la edificación, transmisión, infiltración, renovación del aire y ventilación.

Estos factores estarán determinados por una serie de condiciones que se presenten al interior de una vivienda, como por ejemplo la cantidad de ropa con que vista la persona, el tipo de aislación que posea el recinto, los elementos que se empleen para generar calefacción y ventilación etc.

En resumen, el confort térmico no es otra cosa que el mantenimiento de un ambiente que permita la regulación normal del cuerpo ante las condiciones del ambiente, sin que con ello se provoque sensaciones de desagrado.

2.2.2. Arquitectura bioclimática

Existen muchas definiciones para el concepto de Arquitectura Bioclimática, pasamos a mencionar algunas:

La arquitectura bioclimática es un tipo de arquitectura que persigue controlar y optimizar el comportamiento energético de las edificaciones, y reducir, con ello, su impacto ambiental, a partir de unos criterios de diseño basados en la obtención del máximo partido de los elementos constructivos y funcionales propios del edificio, teniendo en consideración y aprovechando al máximo las características climáticas del emplazamiento donde se ubica (Ibañes P., 2015).

De acuerdo con la posición de Muñoz (Muñoz Veneros, 2003), “la construcción bioclimática se preocupa específicamente de la eficiencia energética dentro de la casa, no tanto de los materiales que utiliza y mucho menos de un enfoque ético que involucre las desigualdades sociales”. Cabe mencionar que esta definición se apega específicamente a las manifestaciones de arquitectura bioclimática actuales, donde aparentemente el enfoque bioclimático es utilizado para satisfacer las necesidades de ciertos grupos sociales, haciendo uso de tecnologías que muchas veces terminan por representar un daño al medio ambiente y, por lo tanto, dejando de lado el concepto integral de desarrollo.

De acuerdo con (Olgay, 2002), el proceso constructivo de una vivienda climáticamente equilibrada se divide en cuatro etapas: 1) Análisis de los elementos climáticos del lugar, 2) Evaluación biológica, 3) Análisis de las soluciones tecnológicas aplicables, y 4) Aplicación arquitectónica.

La arquitectura bioclimática puede definirse como la arquitectura diseñada sabiamente para lograr un máximo confort dentro del edificio con el mínimo gasto energético. Para ello aprovecha las condiciones climáticas de su entorno, transformando los elementos climáticos externos en confort interno gracias a un diseño inteligente. Si en algunas épocas del año fuese necesario un aporte energético extra, se recurriría si fuese posible a las fuentes de energía renovables (García, 2 009).

Si bien existen muchas definiciones y muchos términos equivalentes al de Arquitectura Bioclimática (arquitectura solar pasiva, arquitectura ecológica, arquitectura sostenible, etc.), la idea central es la misma: *cero* de fuentes de energías contaminantes, una de las razones por la cual los conceptos y enfoques asociados a la arquitectura bioclimática son cada vez más tomados en cuenta es la utilización cada vez más intensa de energía en los edificios, lo que conduce a un deterioro del medio ambiente y a una dependencia cada vez mayor hacia los países suministradores de las fuentes de energía de combustibles fósiles. Esto sucede debido a que buena parte de las edificaciones actuales confieren a sus ocupantes unos, cada vez más exigentes, niveles de confort a costa del consumo de grandes cantidades de energía, pues las condiciones de confort se obtienen casi exclusivamente a partir de instalaciones (mecánicas, eléctricas, térmicas) cada vez más complejas, que consumen cantidades elevadas de energía y hacen que la habitabilidad de los edificios dependan de la disponibilidad y continuidad del suministro de fuentes de energía (comodidad = mayor gasto de energía), (Espinoza y Huaylla, 2009).

Por otro lado, la arquitectura bioclimática tiene una estrecha relación con la eficiencia energética, siendo los cuatro parámetros que definen el comportamiento térmico del edificio: el control de ganancias, el control de pérdidas, el control de la demanda y el estado de la tecnología; factores tomados en cuenta en las estrategias de diseño, (Espinoza y Huaylla, 2009).

2.2.3. Arquitectura sostenible

La arquitectura sostenible se engloba un proceso que influyen numerosos parámetros que tienen como consecuencia una ciudad eficiente y respetuosa con el medio ambiente, garantizando un nivel de bienestar para los ciudadanos. Uno de los principales retos es que todas las construcciones de viviendas sean sustentables y autosuficientes. Una vivienda sustentable responde positivamente a las condiciones sociales, culturales, técnicas y económicas de su entorno en los límites de la vivienda. La arquitectura sustentable debe ser adaptable de acuerdo al tamaño y tipo de predio, a la orientación y ubicación.

Ante cualquier condición climática, la vivienda debe intentar conseguir el máximo nivel de confiabilidad, lo cual implica el estudio de varios parámetros y factores, como los climáticos o meteorológicos, el cual es un conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan a la comunidad o barrio.

Puede decirse que la especialidad de arquitectura sostenible se desprende de la corriente de desarrollo sostenible. En sí, la arquitectura sostenible podría definirse como toda aquella que aprovecha al máximo los recursos disponibles, intentando conscientemente reducir los efectos negativos que sus productos puedan ocasionar al medio ambiente.

La arquitectura sustentable, también denominada arquitectura sostenible, arquitectura verde, eco-arquitectura y arquitectura ambientalmente consciente, es un modo de concebir el diseño arquitectónico de manera

sostenible, buscando aprovechar los recursos naturales de tal modo que minimicen el impacto ambiental de las viviendas o edificios sobre el medio ambiente y sus habitantes. Los principios de la arquitectura sustentables incluyen:

- La consideración de las condiciones climáticas, la hidrografía y los ecosistemas del entorno en que se construyen los edificios, para obtener el máximo rendimiento con el menor impacto.
- La eficacia y moderación en el uso de materiales de construcción, primando los de bajo contenido energético frente a los de alto contenido energético.
- La reducción del consumo de energía para calefacción, refrigeración, iluminación y otros equipamientos, cubriendo el resto de la demanda con fuentes de energía renovables.
- La minimización del balance energético global de la edificación, abarcando las fases de diseño, construcción, utilización y final de su vida útil.
- El cumplimiento de los requisitos de confort higrotérmico, salubridad, iluminación y habitabilidad de las edificaciones.

Es necesario hacer notar que toda alteración al medio ambiente, incluidas las construcciones, tienen efectos negativos sobre él. Sin embargo, es necesario saber identificar qué tipo de daños se está haciendo para poder resarcirlo en el mismo lugar afectado y su entorno recordando que se está tratando con el

ecosistema, razón por la cual es necesario comprender las relaciones entre todas y cada una de las partes que lo componen, de manera que el impacto ocasionado, o huella ecológica, se mantenga dentro de un límite que permita al ecosistema su propia recuperación, para que también pueda ser aprovechado por las futuras generaciones. Por lo tanto, uno de los retos de la arquitectura sostenible es lograr un equilibrio entre las edificaciones y el territorio.

2.3. MÉTODOS DE MODELADO DE VIVIENDAS

Los métodos de modelado de la vivienda se pueden dividir en dos enfoques: *enfoque de avance* y *enfoque inverso* (Reference, 2016). El enfoque de avance está basado en modelos matemáticos que describen los fenómenos de transporte de energía y masa en los edificios. El objetivo es predecir las variables de salida de un modelo específico y de parámetros conocidos cuando es sujeto a variables de entrada específicas. En cambio, en el enfoque inverso las variables de entrada y salida son conocidas y el objetivo es determinar una descripción matemática de la vivienda. Entonces el enfoque inverso sólo puede ser aplicado en la vivienda existente.

2.3.1. Balance de energía para el aire dentro de una vivienda

Puesto que las superficies interiores de una habitación se caracterizan por ser: paredes planas verticales, superficies planas horizontales, superficies planas con cierta inclinación; y puesto que la transferencia de calor entre dichas superficies interiores y el aire ambiente interior es por convección natural (se

considera que el intercambio de energía por radiación es sólo entre superficies y dicho efecto se ve en las mismas temperaturas superficiales de paredes, techos, etc.); se pueden utilizar relaciones empíricas (asociadas a las geometrías de las superficies) para determinar coeficientes de convección peliculares, (Churchill, 1975).

Este planteamiento deja ver que el aire dentro de una vivienda se calienta o enfría exclusivamente por flujos de calor convectivo entre superficies y aire. Se considera un flujo de calor por convección natural ya que dentro de las habitaciones usualmente la velocidad del viento es pequeña y el movimiento del aire se da por diferencia de densidades. Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas, la ecuación de balance de energía para un volumen de control del aire dentro de una habitación en cada instante viene dada por la siguiente expresión (Espinoza y Huaylla, 2009):

$$\sum_i A_i h_{convi} (T_{si} - T_{int}) + \dot{m}_{inf} c_{p_{aire}} (T_{ae} - T_{aire}) = \rho_{aire} c_{p_{aire}} V_{aire} \frac{\partial T_{aire}}{\partial t} \quad (2.3.1)$$

Donde:

- $\sum_i A_i h_{convi} (T_{si} - T_{int})$ Suma de flujos de calor convectivo natural desde cada superficie hacia el aire de la habitación [W].
- T_{ae} es la temperatura del aire exterior que ingresa a la zona térmica [K].
- $c_{p_{aire}}$ Calor específico de la habitación [J/kgK].
- \dot{m}_{inf} . Masa por la unidad de tiempo con que el aire de la habitación es renovado [kg/s].

- V_{aire} Volumen del aire de la habitación [m^3].

De este modo; Los términos indicados del primer miembro representan los siguientes fenómenos de transferencia energética:

- Primero: suma de flujos de calor por convección.
- Segundo: flujo de energía debido a los fenómenos de infiltración y ventilación.

El segundo miembro de esta ecuación representa Variación de energía interna del aire interior. A lo largo de todo el día será y en función de las simplificaciones asumidas para describir los parámetros UA, es posible expresar la ecuación de balance energético sobre el aire interior como sigue:

$$UA(T_{si} - T_{int}) + \int_{\text{día}} \dot{m}_{\text{inf}} C_{p\text{aire}} (T_{ae} - T_{\text{aire}}) dt = \int_{\text{día}} \rho_{\text{aire}} C_{p\text{aire}} V_{\text{aire}} \left[\frac{\partial T_{\text{aire}}}{\partial t} \right] dt \quad (2.3.2)$$

En esta ecuación se considera que T_{aire} es una función armónica (seno o coseno con periodo $T=24$ horas), por lo tanto $[\partial T_{\text{aire}} / \partial t]$ también lo es, y la integral de esta derivada a lo largo del día es nula. Por lo tanto la ecuación anterior se reduce a,

$$Q_{\text{total de todas las superficies}} + Q_{\text{total debido a infiltraciones}} \approx 0 \quad (2.3.3)$$

Esta ecuación pone en evidencia que si se eliminaran completamente las infiltraciones en la habitación, la energía neta transmitida desde las superficies interiores al aire debería ser nula. De las ecuaciones anteriores se deduce que

las infiltraciones influyen directamente sobre la temperatura del aire de la habitación a lo largo del día, (Espinoza y Huaylla, 2009).

2.4. MODELOS ADOPTADOS PARA OBTENER EL DESEMPEÑO TÉRMICO EN EDIFICACIONES

El análisis bioclimático es un medio para lograr el diseño de las viviendas confortables, que funcionen como sistemas termodinámicos eficientes, lo cual implica que se logre la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía. En el modelado computacional de edificaciones existen dos tipos de enfoques, el de avance y el inverso. Para el desarrollo del modelo matemático para simulación del desempeño térmico de viviendas se utilizó el enfoque de avance ya que este puede considerar y evaluar una mayor cantidad de opciones de diseño en las viviendas. Mientras que el enfoque inverso requiere contar con datos sobre el desempeño térmico de la vivienda.

Para la simulación térmica de las viviendas. En particular se seleccionó el método de balance de calor debido principalmente a tres razones. Es un método sencillo de implementar, es uno de los métodos más ampliamente estudiados, y puede ser aplicado a una amplia variedad de edificaciones. Además, este método requiere menor tiempo de cómputo sin perder exactitud en el cálculo de la carga térmica.

El método de balance de calor consiste básicamente en resolver dos balances de calor de superficie, uno en la superficie exterior y otro en la superficie interior, las superficies exteriores e interiores comparten información mediante el proceso de transferencia de calor a través de la envolvente.

2.5. BALANCE DE CALOR EN EL AIRE DE LA ZONA TÉRMICA

El balance de calor en el aire de la zona es la parte central del método de balance de calor. Agregando a la ecuación de balance de calor del aire de la zona, ecuación (2.3.3), los términos para el modelado de cada una de las aportaciones de calor, tal como se indican en: (Reference, 2016), se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\rho C_p V_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{ns} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum Q_f + \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) + \sum_{i=1}^{nz} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + Q_{sis} \quad (2.5.1)$$

Donde $\sum_{i=1}^{ns} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ representa el calor transferido desde las superficies de la zona, $\sum Q_f$ es la suma de las cargas convectivas de calor de las fuentes internas, $\dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$ es el calor transferido debido a infiltraciones del aire exterior, $\sum_{i=1}^{nz} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ es el calor transferido debido a la mezcla del aire de la zona con el aire de otras zonas, Q_{sis} es la cantidad de calor que remueve o añade el sistema de HVAC.

Por otra parte, para el término derivativo Taylor (Taylor, 1990) sugieren emplear una aproximación de tercer orden:

$$\frac{dT_z}{dt} \approx (\delta t)^{-1} \left(\frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (2.5.2)$$

Esta aproximación ha demostrado comportarse de manera estable para pasos de tiempo de hasta 1 hr. Ahora bien, combinando las ecuaciones (3.2.1) y (3.2.2) y despejando la temperatura T_z se obtiene la ecuación para calcular la temperatura del aire en las zonas interiores de la vivienda:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{ns} h_i A_i T_{si} + \sum Q_f + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \sum_{i=1}^{nz} \dot{m}_i C_p T_{zi} + Q_{sis} + \left(T_z^{t-\delta t} - \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} + \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right)}{\frac{11}{6} \frac{\rho C_p V_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{ns} h_i A_i + \dot{m}_{inf} C_p + \sum_{i=1}^{nz} \dot{m}_i C_p} \quad (2.5.3)$$

En el caso de que se mantenga encendido el sistema HVAC, en la ecuación (3.2.1) se elimina el término derivativo y se despeja para Q_{sis} para calcular la cantidad de calor que el sistema debe añadir o remover para mantener una temperatura de operación fija, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_{sis} = \sum_{i=1}^{ns} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum Q_f + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \sum_{i=1}^{nz} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) \quad (2.5.4)$$

Esta es la forma usada en el programa Energy Plus. Desde que las necesidades de calentamiento o enfriamiento (a través de los equipos HVAC) sobre la zona conducen el proceso completo, la cantidad de energía requerida para el acondicionamiento es usada como punto de partida para dimensionar la demanda de energía por parte de los equipos HVAC. Posteriormente una simulación del sistema provee la capacidad real de suministro y la temperatura de la zona es ajustada en caso sea necesario. Este proceso en EnergyPlus se denomina el *Predicción/Corrección*, cuyo esquema se resume a continuación (Reference, 2016)

En el esquema predictor-corrector primero se estima, con la ecuación (3.2.4), la energía que se requiere para el balance de la ecuación cuando la temperatura del aire de la zona es igual al *set-point*. Luego, el sistema HVAC es simulado para determinar la capacidad de suministro efectiva de este en el momento requerido. Posteriormente, el valor calculado de capacidad de suministro efectiva se emplea en la ecuación (3.2.3) para calcular la temperatura del aire de la zona.

Para determinar el calor transferido desde las superficies hacia el interior de las zonas son necesarios los balances de calor en las superficies exteriores e interiores.

2.5.1. Infiltraciones

La determinación del aire del ambiente exterior que se infiltra hacia el interior de la vivienda puede resultar una tarea muy complicada. En ocasiones se encuentra relacionado con la diferencia de la temperatura del ambiente exterior e interior, y a la velocidad del viento.

En el modelado del flujo másico debido a infiltraciones se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{inf} = \frac{\rho V_z ACH}{3600} \quad (2.5.5)$$

Donde ρ es la densidad del aire, V_z es el volumen de la zona y ACH son los cambios de aire por hora.

2.6. BALANCE DE CALOR EN LAS SUPERFICIES EXTERIORES

En la figura 7, se muestra un esquema del balance de calor en las superficies exteriores. En el balance de calor se consideran los flujos de calor por radiación de onda corta y larga, convección y conducción. En las siguientes secciones se presentan los modelos empleados para evaluar dichos flujos de calor.

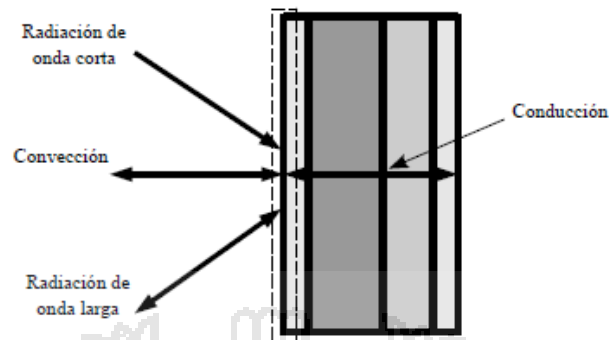


Figura 7. Balance de calor en las superficies exteriores.

Fuente: (Reference, 2016)

La expresión concreta del balance de calor para **superficies exteriores** se presenta en la siguiente ecuación:

$$Q_{\alpha sol} + Q_{rol} + Q_{he} \pm Q_{ke} = 0 \tag{2.6.0}$$

Donde $Q_{\alpha sol}$ es el flujo de calor por radiación solar directa y difusa absorbido por la superficie, Q_{rol} es el intercambio de radiación de onda larga de la superficie con el aire y los alrededores, Q_{he} es el flujo de calor por convección y Q_{ke} es el flujo de calor por conducción. Todos los términos son positivos excepto el flujo de calor por conducción (Q_{ke}), el cual es tomado tradicionalmente como positivo en la dirección del exterior hacia el interior del edificio.

2.6.1. Radiación de onda corta en superficies exteriores

El flujo de calor que absorben las superficies exteriores $q_{\alpha sol}$, debido a la radiación solar incidente sobre ellas, se modela con la siguiente ecuación:

$$q_{\alpha sol} = \alpha_s I_{T,s} \tag{2.6.1}$$

Donde α_s es la absorptividad térmica de la superficie y $I_{T,s}$ es la irradiación solar total que incide sobre la superficie. La irradiación $I_{T,s}$ tiene tres componentes, como se muestra en la figura 3.1, irradiación solar directa $I_{dir,s}$, irradiación solar difusa $I_{dif,s}$, e irradiación solar reflejada en el terreno de los alrededores $I_{alr,s}$:

$$I_{T,s} = I_{dir,s} + I_{dif,s} + I_{alr,s} \quad (2.6.2)$$

Para el cálculo de cada una de las componentes de la irradiación se empleó el modelo de *Clear-Sky* de la (ASHRAE, 2012). De acuerdo a este modelo, la irradiación directa sobre superficies se determina con la siguiente ecuación:

$$I_{dir,s} = I_{dir} \cos \theta \quad (2.6.3)$$

Donde I_{dir} es la radiación solar directa y θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre la superficie. La ecuación (3.3.3) sólo es válida cuando el $\cos \theta > 0$, de otro modo $I_{dir,s} = 0$. Esto significa que superficies con un ángulo $\theta \leq 0$ se encuentran a la sombra. El ángulo de incidencia θ se calcula con la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \varphi \sin \Sigma_s + \sin \beta \cos \Sigma_s \quad (2.6.4)$$

Donde φ es la diferencia entre el ángulo de acimut solar (γ) y el ángulo de acimut de superficie (γ_s) (los ángulos relacionados con la posición solar y con la superficie), es decir:

$$\varphi = \gamma - \gamma_s \quad (2.6.5)$$

Para calcular la irradiación solar difusa se emplea la siguiente ecuación:

$$I_{dif,s} = I_{dif}\omega \quad (2.6.6)$$

Donde I_{dif} es la radiación solar difusa y ω es la razón entre la radiación difusa sobre una superficie vertical y la radiación difusa sobre una superficie horizontal. Cabe aclarar que este modelo considera que el cielo es isotrópico, es decir no se considera que algunas partes del cielo como el horizonte o el disco solar tienden a ser más brillantes. ω Se calcula de la siguiente manera:

$$\omega = \max(0.45, 0.55 + 0.437\cos\theta + 0.313\cos^2\theta) \quad (2.6.7)$$

Cabe destacar que las ecuaciones (3.3.6) y (3.3.7) sólo son apropiadas para condiciones de cielo despejado.

La irradiación reflejada en el terreno de los alrededores que incide sobre la superficie se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{atr,s} = (I_{dif}\text{sen}\beta + I_{dif})\rho_{atr} \frac{1 - \cos\Sigma_s}{2} \quad (2.6.8)$$

Donde ρ_{atr} es la reflectancia (también llamado albedo) del terreno y Σ_s es la inclinación de la superficie.

2.6.2. Radiación de onda larga en superficies exteriores

El flujo de calor por radiación de onda larga que intercambian las superficies exteriores del edificio con sus alrededores q_{rol} se puede dividir en tres componentes:

$$q_{rol} = q_{cielo} + q_{aire} + q_{atr} \quad (2.6.9)$$

Donde q_{cielo} , q_{aire} y q_{alr} son los flujos de calor que intercambia la superficie con el cielo, el aire y los alrededores, respectivamente. Aplicando la ley de Stefan-Boltzmann a cada componente se obtiene:

$$q_{rot} = \varepsilon\sigma[F_{cielo}(T_{cielo}^4 - T_{se}^4) + F_{aire}(T_{aire}^4 - T_{se}^4) + F_{alr}(T_{alr}^4 - T_{se}^4)] \quad (2.6.10)$$

Donde ε es la emisividad de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, y T_{se} es la temperatura de la superficie exterior.

Para hacer compatible la ecuación (3.3.10) con el método iterativo empleado en el código para resolver las ecuaciones de balance de calor, se linealiza dicha ecuación introduciendo coeficientes de transferencia de calor por radiación, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$q_{rot} = \dot{h}_{cielo}(T_{cielo}^4 - T_{se}^4) + \dot{h}_{aire}(T_{aire}^4 - T_{se}^4) + \dot{h}_{alr}(T_{alr}^4 - T_{se}^4) \quad (2.6.11)$$

$$\dot{h}_{cielo} = \frac{\varepsilon\sigma F_{cielo}(T_{cielo}^4 - T_{se}^4)}{T_{cielo}^4 - T_{se}^4} \quad (2.6.12)$$

$$\dot{h}_{aire} = \frac{\varepsilon\sigma F_{aire}(T_{aire}^4 - T_{se}^4)}{T_{aire}^4 - T_{se}^4} \quad (2.6.13)$$

$$\dot{h}_{alr} = \frac{\varepsilon\sigma F_{alr}(T_{alr}^4 - T_{se}^4)}{T_{alr}^4 - T_{se}^4} \quad (2.6.14)$$

Los factores de forma para el cielo y el terreno de los alrededores se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$F_{cielo} = \frac{1 - \cos\Sigma_s}{2} \quad (2.6.15)$$

$$F_{alr} = \frac{1 + \cos \Sigma_s}{2} \quad (2.6.16)$$

El factor de forma F_{cielo} se divide entre la radiación hacia el cielo y hacia el aire:

$$\zeta = \left(\frac{1 + \cos \Sigma_s}{2} \right)^{1/2} \quad (2.6.17)$$

Entonces, la forma final de los coeficientes de radiación es:

$$\dot{h}_{cielo} = \frac{\varepsilon \sigma F_{cielo} \zeta (T_{cielo}^4 - T_{se}^4)}{T_{cielo}^4 - T_{se}^4} \quad (2.6.18)$$

$$\dot{h}_{aire} = \frac{\varepsilon \sigma F_{aire} (1 - \zeta) (T_{aire}^4 - T_{se}^4)}{T_{aire}^4 - T_{se}^4} \quad (2.6.19)$$

$$\dot{h}_{alr} = \frac{\varepsilon \sigma F_{alr} (T_{alr}^4 - T_{se}^4)}{T_{alr}^4 - T_{se}^4} \quad (2.6.20)$$

La temperatura del cielo (T_{cielo}) se determina con el modelo empleado por.

$$T_{cielo} = \left(\frac{IR_{hor}}{\sigma} \right)^{1/4} - 273.15 \quad (2.6.21)$$

Donde IR_{hor} es la intensidad de radiación infrarroja horizontal y σ es la constante de Stefan-Boltzmann. IR_{hor} Se calcula con la siguiente ecuación:

$$IR_{hor} = \varepsilon_{cielo} \sigma T_{aire}^4 \quad (2.6.22)$$

Donde ε_{cielo} es la emisividad del cielo, misma que se determina de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\text{cielo}} = \left[0.787 + 0.764 \ln \left(\frac{T_{pr}}{273.15} \right) \right] \left[1 + 0.0244A_{op} + 0.0035A_{op}^2 + 0.00028A_{op}^3 \right] \quad (2.6.23)$$

Donde T_{pr} es la temperatura del punto de rocío y A_{op} es la cobertura opaca del cielo. Estas dos últimas variables se encuentran típicamente en los datos meteorológicos. Cabe señalar que en las ecuaciones (3.3.22) y (3.3.23) las temperaturas se deben introducir en valores absolutos [K].

La temperatura del terreno de los alrededores (T_{air}) se calcula con la temperatura sol-aire ($T_{sol-aire}$). La temperatura sol-aire se puede definir como la temperatura del aire exterior que, en ausencia de todos los intercambios de radiación da como resultado el mismo de flujo de calor que entra hacia la superficie, como lo haría la combinación de la radiación solar incidente, el intercambio de calor por radiación de onda larga y por convección. $T_{sol-aire}$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_{sol-aire} = T_e + \frac{I\vartheta}{h_o} \quad (2.6.24)$$

Donde T_e es la temperatura del aire ambiental exterior, I es la radiación incidente, ϑ es la absortancia del elemento exterior, y h_o es la resistencia superficial exterior (o coeficiente de convección más radiación).

Ahora bien, para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección se estima con la correlación presentada por Palyvos (Palyvos, 2008):

$$h_o = h_w + h_{rad} \quad (2.6.25)$$

Donde:

$$h_w = 5.8 + 3.94v \quad (2.6.26)$$

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon_{se} T_{se}^4 \quad (2.6.27)$$

Donde v es la velocidad de viento del aire del ambiente exterior, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ es la constante de Stefan Boltzmann, ε_{se} es la emitancia de la superficie exterior, y T_{se} es la temperatura de la superficie exterior.

2.6.3. Convección en superficies exteriores

Para modelar la transferencia de calor por convección entre la superficie y el aire exterior q_c se emplea la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$\frac{q_c}{A} = h_e \Delta T = h_e (T_{amb} - T_{zona}) \quad (2.6.28)$$

Donde h_e es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

2.7. BALANCE DE CALOR EN LAS SUPERFICIES INTERIORES

En la figura 8, se muestra un esquema del balance de calor en las superficies interiores. El balance de calor considera la radiación solar transmitida a través de las ventanas, la radiación debida a sistemas de iluminación, la convección, el intercambio de radiación con otras superficies, la radiación debida a fuentes internas y la conducción. En las siguientes secciones se presentan los modelos empleados para evaluar cada flujo de calor.

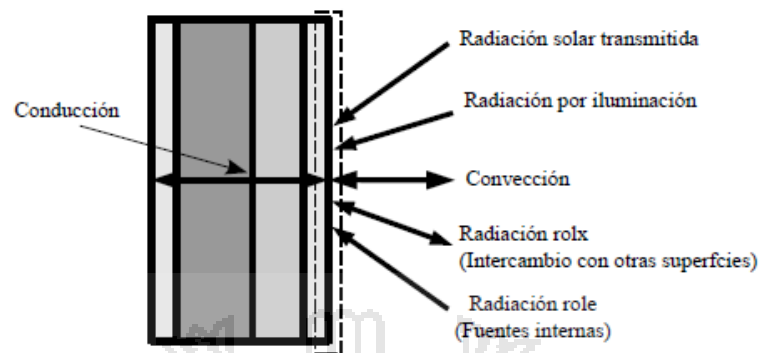


Figura 8. Balance de calor en las superficies interiores.

Fuente: (Reference, 2016)

El balance de calor para **superficies interiores** se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q_{sol} + Q_{ilum} + Q_{rols} + Q_{rolf} + Q_{hi} + Q_{ki} = 0 \quad (3.4.0)$$

Donde Q_{sol} es la radiación solar transmitida por aberturas que es absorbida por la superficie, Q_{ilum} es el flujo de calor por radiación de onda corta debida a la iluminación artificial que incide sobre la superficie, Q_{rols} es el intercambio de calor por radiación de onda larga entre superficies de la zona, Q_{rolf} es la flujo de calor por radiación de onda larga debida a fuentes internas que incide sobre la superficie, Q_{hi} es el flujo de calor por convección, y Q_{ki} es el flujo de calor por conducción.

2.7.1. Irradiación solar incidente sobre superficies interiores

Para calcular la irradiación solar que incide y es transmitida $q_{\infty sol}$ a través de las ventanas de la envolvente se utilizó el modelo presentado por (Underwood, 2004). Este modelo distribuye uniformemente la irradiación solar directa únicamente sobre el suelo, mientras que la irradiación difusa es distribuida uniformemente sobre todas las superficies del recinto.

El cálculo de la irradiación que incide sobre el suelo interior se emplea la siguiente ecuación:

$$q_{sol} = \frac{1}{\sum A_s} \sum_{j=1}^{nvt_n} A_{vnt,j} \tau_j I_{dif,j} + \frac{1}{A_{suelo}} \sum_{j=1}^{nvt_n} FAW_j A_{vnt,j} \tau_j I_{dir,j} \quad (2.7.1)$$

Y para el resto de las superficies se emplea la siguiente ecuación:

$$q_{sol} = \frac{1}{\sum A_s} \sum_{j=1}^{nvt_n} A_{vnt,j} \tau_j I_{dif,j} \quad (2.7.2)$$

Donde $A_{vent,j}$, τ_j , $I_{dif,j}$, $I_{dir,j}$ son el área, la transmitividad, la irradiación difusa y directa de la ventana j -ésima, respectivamente, FAW_j es la fracción de área de la ventana sobre la que incide la irradiación solar directa, $\sum A_s$ es la sumatoria del área de todas las superficies y A_{suelo} es el área del suelo.

2.7.2. Radiación debida a sistemas de iluminación y otras fuentes internas

De manera similar a la irradiación solar que incide sobre las superficies interiores del recinto, la distribución de la radiación de los sistemas de iluminación q_{ilum} y de otras fuentes internas misceláneas q_{rolf} , y son predefinidas de la siguiente manera:

$$q_{ilum} = \frac{Q_{r_{ilum}}}{\sum A_s} \quad (2.7.3)$$

$$q_{rolf} = \frac{Q_{r_{misc}}}{\sum A_s} \quad (2.7.4)$$

Donde $Q_{r_{ilum}}$ es la fracción radiativa de la carga térmica de iluminación, $Q_{r_{misc}}$ es la suma de todas las fuentes internas radiantes de calor y $\sum A_s$ es la suma de las áreas de las superficies de la zona. Obsérvese que la radiación debida a estas fuentes se distribuye uniformemente en todas las superficies del recinto.

2.8. SIMULACIÓN ENERGÉTICA

La simulación energética (Energy - Modeling) de edificios consiste en el análisis de una construcción o complejo empleando software especializado, para obtener los resultados de sus consumos energéticos y los gastos en equipos de regulación térmica como son el aire acondicionado, los circuitos de agua caliente o las calderas. A partir de la distribución del edificio, la colocación de las instalaciones térmicas y eléctricas y de las condiciones climáticas externas como entradas, el programa predice unas salidas resultantes pasado un año u otra cantidad de tiempo.

A partir de la realización de una simulación energética en una construcción podemos considerar la certificación de eficiencia energética. Con el consumo energético estimado en la simulación se pueden comparar los sistemas de edificios con el de otros edificios de similares características. Si se considera que la instalación energética permite un ahorro adecuado de materias primas y dinero, se otorga la correspondiente certificación energética.

Los procedimientos para llevar a cabo una certificación pueden ser muy variados, debido a la gran cantidad de programas informáticos existentes para realizar esta labor.

En la actualidad los proyectos de certificación de eficiencia energética realizados

mediante el empleo de sistemas de simulación por ordenador dentro de la Unión Europea se desarrollan mayoritariamente empleando los programas *Calener* o *Lider*. No obstante también existen otros programas que pueden ser empleados con buenos resultados.

EnergyPlus es un software de simulación de edificios creado y regularmente modificado por U.S. Department of Energy Building Technologies Office, que es utilizado para el desarrollo de proyectos de simulación de resultados en el marco internacional. Actúa como un sistema de caja negra, de forma que no se pueden observar los cálculos internos que se producen, ni las correlaciones entre los parámetros introducidos, solamente se controlan las entradas y se obtienen las salidas en forma de hojas de cálculo, texto o un archivo gráfico, (Fernandez, 2012).

2.8.1. Simulador energético Energy Plus

Energy Plus es un programa de cálculo de balance térmico creado por el U.S. Department of Energy. Su motor de cálculo es una versión desarrollada a partir de las herramientas de simulación DOE-2 y BLAST, también creadas por este departamento en las décadas de los 70.

Es un programa empleado para definir las necesidades energéticas de un edificio, optimizar el rendimiento de las instalaciones geométricas y adaptar un edificio ya definido a las condiciones térmicas pedidas, de forma eficiente.

Energy Plus es una herramienta de trabajo en continua actualización y mejora.

Desde su creación se ha ido ampliando el abanico de variables que pueden

ser modificadas y que afectan a los gastos totales, hasta la versión actual. Todas estas modificaciones convierten a Energy Plus en una de los programas de cálculo térmico más versátiles del mercado.

Algunas posibilidades que permite Energy Plus:

- Soluciones integrales para cada zona térmica en la que confluyan tanto condiciones de zona como sistema HVAC.
- Climatización y movimiento de corrientes de aire simultáneamente en zonas.
- Intervalos de tiempo que se pueden definir por el propio usuario.
- Cálculo de balances térmicos en las superficies combinado radiación y convección.
- Control de luminarias.

2.8.2. Interfaz de trabajo con Energy Plus

Dentro del paquete de trabajo con Energy Plus existen varias aplicaciones que serán importantes para realizar proyectos de simulación. Las más importantes son el EP-Compare, EP-Launch y el IDF Editor.

- **EP Compare** es un programa de análisis de las salidas producidas con Energy Plus con el que podemos comparar las tablas de los datos resultantes de varias simulaciones.

- **EP Launch** actúa tanto de motor de cálculo para el modelo introducido como vía de entrada de archivos .idf y salida de archivos, según el tipo que fue seleccionado y hojas de análisis de la programación.

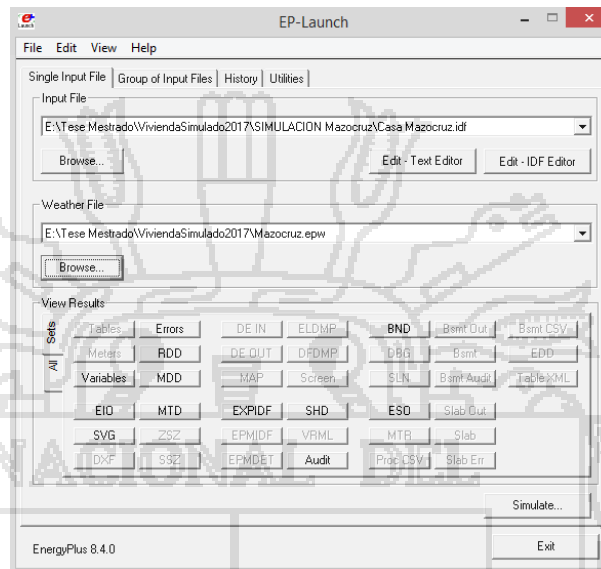


Figura 9. EP- Launch.

- **IDF Editor** es el programa con el que se crean, añaden y editan elementos, zonas y condiciones del modelo de la vivienda que vamos a simular. Consiste en un listado de todas las características de la vivienda y su entorno, subdivididas en forma de hojas de cálculo en las que se registran las variables y las condiciones que se les pueden imponer a estas.

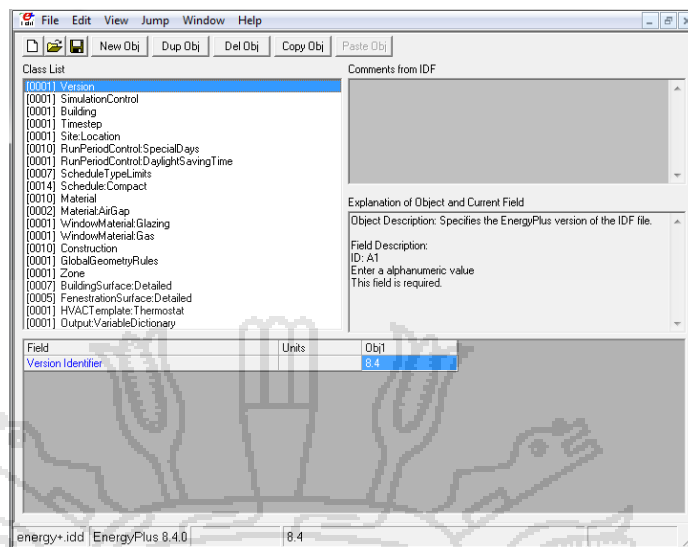


Figura 10. Interfaz inicial del programa IDF editor: Energy Plus v8.4.0.

2.8.3. Elaboración del Archivo de Entrada para el modelado de la vivienda altoandina en Energy Plus

Con el fin de realizar un estudio adecuado de los elementos que definen la arquitectura, los equipos energéticos y la rutina de operaciones en la vivienda, se ha organizado según el orden que se seguiría para introducir los parámetros a partir de un archivo en blanco.

Para ayudar a la comprensión de las gráficas, se han incluido los datos de la tabla en el anexo 01 en las que se encuentran todos los elementos que estaban incluidos en el archivo CYPE y a continuación se describen detalladamente todas las clases y objetos utilizados en la elaboración del IDF para la simulación de la vivienda altoandina.

Parámetros de la Simulación

[0001] Building		
Field	Units	Obj1
Name		Vivienda Maz-Puno
North Axis	deg	0
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value		0.04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0.4
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25

Figura 11. Captura de los parámetros de simulación de la vivienda altoandina en idf editor.

Versión

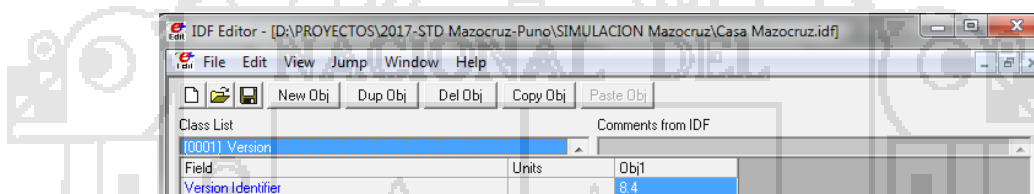


Figura 12. Parámetros de simulación “versión”

Control de simulación

Bajo este título se recogen las opciones generales que hay para el cálculo de simulaciones. Aquí se pueden activar o desactivar los Sizing Calculations, que permiten hacer los cálculos térmicos en cada zona y por cada sistema HVAC. También se incluyen las *Run Simulation* en periodos de simulación fijos o según los periodos dados por archivos climatológicos.

En el caso de este programa, no aparecen los *Sizing Calculations* por zonas ya que al emplear únicamente sistemas de cargas de aire ideales no hacen

falta realizar cálculos complejos. Habría que activar estas opciones al introducir sistemas HVAC.

[0001] SimulationControl		
Field	Units	Obj1
Do Zone Sizing Calculation		No
Do System Sizing Calculation		No
Do Plant Sizing Calculation		No
Run Simulation for Sizing Periods		No
Run Simulation for Weather File Run Periods		Yes
Do HVAC Sizing Simulation for Sizing Periods		
Maximum Number of HVAC Sizing Simulation Passes		

Figura 13. Parámetros de simulación “simulation control”.

Localización del lugar del emplazamiento de la vivienda

[0001] Site:Location		
Field	Units	Obj1
Name		Mazocruz-Puno
Latitude	deg	-16.74
Longitude	deg	-69.72
Time Zone	hr	-5
Elevation	m	3982

Figura 14. Parámetros de simulación “localización de lugar”.

Periodo de ejecución

[0001] RunPeriod		
Field	Units	Obj1
Name		Jun-Ago
Begin Month		6
Begin Day of Month		1
End Month		8
End Day of Month		30
Day of Week for Start Day		UseWeatherFile
Use Weather File Holidays and Special Days		Yes
Use Weather File Daylight Saving Period		Yes
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		Yes
Number of Times Runperiod to be Repeated		1

Figura 15. Parámetros de simulación “localización de lugar”.

Elementos de construcción de superficies

Materiales:

Dentro de este subgrupo se van a clasificar los distintos materiales que componen la estructura de la vivienda según sus características físicas y a la función que van a realizar.

- Materiales opacos másico (volumétricos): consideran la formación de superficies o elementos con un determinado espesor.

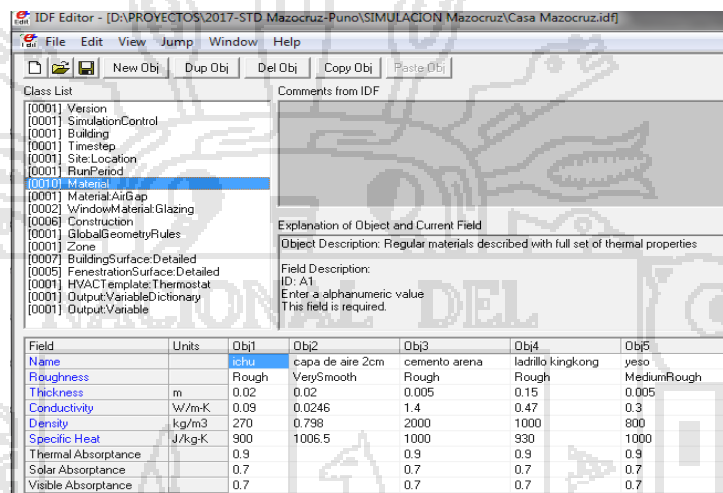


Figura 16. Ejemplos de materiales opacos empleados en la construcción de la vivienda en IDF Editor.

- Materiales no másicos (superficiales): No se consideran su espesor, sino su resistencia térmica y su absorción de diversas radiaciones (térmica, solar y de espectro visible). Dentro de estos materiales se encuentran las puertas y los puentes térmicos.
- Ventanas: presentan características particulares debido a su carácter translucido o transparente que les permite transmitir o reflejar la radiación incidente. Asimismo, se pueden regular otros accesorios adicionales como la existencia de cortinas o marcos.

Field	Units	Obj1
Name		V01
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0.05
Solar Transmittance at Normal Incidence		0.4278
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.4434
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.4434
Visible Transmittance at Normal Incidence		0.6652
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0.15
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0.15
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0

Figura 17. Tipos de acristalamientos en la vivienda y sus características térmicas.

Construcciones:

Los materiales previamente definidos en el primer lugar en este apartado se organizan en capas para constituir elementos de construcción. Así se crean unas variables que representan compuestos, con los que se puede edificar el modelo de forma mucho más esquemática.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		paredes casa	piso casa	techo casa	ventana casa	puerta casa	claraboya casa
Outside Layer		cemento arena	tierra	fibrocemento	Clear 3mm	madera puerta1cm	Polipropileno Clarab.
Layer 2		ladrillo kingkong	piedra	camara aire techo			
Layer 3		yeso	madera piso	ichu			
Layer 4				capa de aire 2cm			
Layer 5				yeso			
Layer 6							

Figura 18. Ejemplos de compuestos para construir paredes a partir de capas de materiales

La forma de organizar estos materiales será de fuera a dentro, introduciendo primero la capa que está en contacto con el entorno, o en caso de muro inferior, la más exterior (Outside Layer). A continuación se van colocando capas de materiales hasta llegar a la más interior. A los compuestos se les dará un nombre de referencia para poder emplearlos en posteriores apartados.

Detalle de las superficies del edificio

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		piso	paredE	paredO	techoAlaS	paredN	paredS	techoAlaN
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Roof	Wall	Wall	Roof
Construction Name		piso casa	paredes casa	paredes casa	techo casa	paredes casa	paredes casa	techo casa
Zone Name		Casa Maz. Puno	Casa Maz. Puno	Casa Maz. Puno	Casa Maz. Puno	Casa Maz. Puno	Casa Maz. Puno	Casa Maz. Puno
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object								
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed

Figura 19. Parámetros de los detalle de las superficies del edificio.

Detalle de las subsuperficies de la vivienda

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		ventanaE	claraboya	puerta	ventanaN1	ventanaN2
Surface Type		Window	Window	Door	Window	Window
Construction Name		ventana casa	claraboya casa	puerta casa	ventana casa	ventana casa
Building Surface Name		paredE	techoAlaN	paredN	paredN	paredN

Figura 20. Parámetros de los detalle de las subsuperficies de la vivienda.

Variables de salida

Field	Units	Obj1
Key Value		*
Variable Name		Zone Air Temperature
Reporting Frequency		Hourly
Schedule Name		

Figura 21. Parámetro de variable de salida.



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

Corresponde al tipo de investigación aplicada de nivel analítico, ya que los resultados permitirán conocer la eficiente aprovechamiento de la energía solar para asegurar el confort térmico en el interior de las viviendas que se ubican en las zonas altodinas de la provincia de El Collao de la región de Puno.

3.1.2. Diseño de investigación

Corresponde al diseño descriptivo, cuasi experimental e interpretativo, por lo que se hace un estudio con el fin de establecer el desempeño térmico que tiene la vivienda y que garantice una vivienda más saludable.

Los siguientes pasos son lineamientos para utilizar el programa de simulación energética de la vivienda, a continuación se describen dichos pasos para simular el desempeño térmico, empleando la herramienta programa Energy Plus que ayudaran a agilizar la creación de modelos de la vivienda, para usar el programa Energy Plus, esta metodología se explicara tomando como base una vivienda típica de la zona rural altoandina.

Paso 1: Planificación

Algunos pasos preliminares que facilitan la construcción del archivo de entrada en Energy Plus requieren alguna información específica. La siguiente lista debe ser completada antes de iniciar a construir el archivo de entrada.

- Obtener información de la localización y datos meteorológicos de lugar donde está ubicado la vivienda. Si es posible, usar uno de los archivos de meteorológicos disponibles en la base de datos, para el periodo de tiempo en que se realizara la ejecución.
- Obtener suficiente información de la construcción de la vivienda para permitir la especificación de la geometría total de la vivienda y las superficies de las construcciones (incluyendo las paredes exteriores, las paredes interiores, tabiques o divisiones (paredes delgadas que separan dos espacios), pisos, techo, cielo falso, ventanas y puertas).
- Obtener suficiente información del uso de la vivienda para permitir la especificación de la iluminación y otros equipos (por ejemplo: Electricidad, gas, etc.) y el número de personas en cada área del edificio.

- Obtener suficiente información de la operación de los sistemas HVAC para permitir la especificación y programación de los sistemas de ventilación.

Paso 2: Zonas de la vivienda

Una Superficie de la vivienda es el elemento fundamental en el modelado de la vivienda. En forma general, hay dos tipos de Superficie en el programa Energy Plus, estas son:

1. Las superficies de transferencia de calor
2. Las superficies de almacenamiento de calor

La primera regla del modelado de la vivienda es, Siempre definir una superficie como una superficie de almacenamiento de calor a menos que se deba definir como una superficie de transferencia de calor. Cualquier superficie que separa espacios a temperaturas significativamente diferentes, debe definirse como una superficie de transferencia de calor. Así, las superficies exteriores, tales como las paredes exteriores, techos y pisos, son superficies de transferencia de calor. Superficies interiores (tabiques o divisiones) son superficies de almacenamiento de calor, si mantienen espacios separados a la misma temperatura y superficies de transferencia de calor si mantienen espacios separados a diferente temperatura.

Un concepto de Zona es uno térmico. Una Zona es un volumen de aire a una temperatura uniforme; es decir que las temperaturas son idénticas en todos los puntos de la superficie, además de todas las superficies de transferencia

de calor y almacenamiento de calor que limitan o están en el interior de ese volumen de aire.

El programa Energy Plus calcula la energía requerida para mantener cada zona a una temperatura específica para cada hora del día. Para que el programa Energy Plus realice un balance de calor por zona, el primer paso es preparar una descripción de la vivienda en donde hay que separar la vivienda en zonas.

En cuanto a la metodología final empleada para hacer una simulación integral de la vivienda altoandina, se ha organizado en tres partes según el programa que se ha utilizado en cada momento. Se comenzó con el software de diseño gráfico **Sketch Up**, con el que se construyeron todos los elementos geométricos y se introdujo la organización en espacios de la vivienda. A continuación se empleó el programa **Open Studio e IDF Editor**, con el que se añadieron las características de los objetos interiores al diseño ya construido o Carga de variables de entrada y variables de salida, dejando el modelo preparado para ser simulado. Finalmente se recurrió al programa **Energy Plus** para que actuara como último corrector del modelo y motor de cálculo para obtener los resultados, (Muños, 2016).

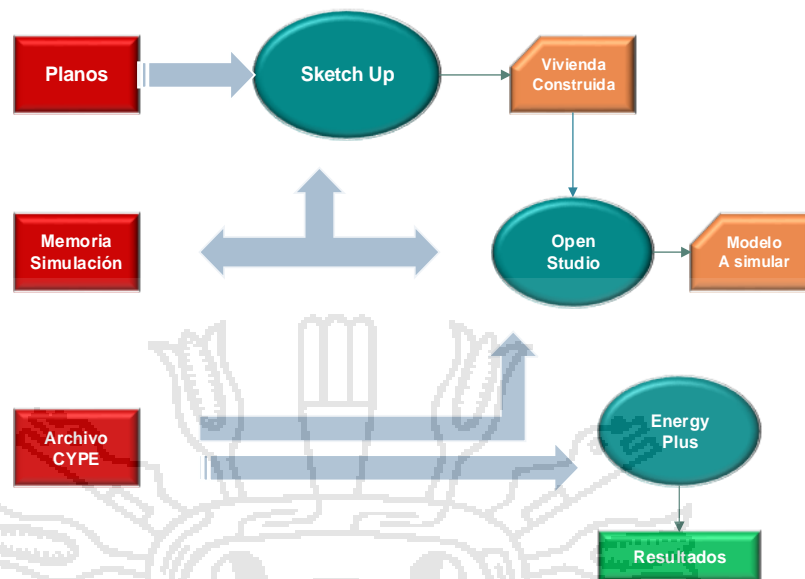


Figura 22. Metodología de la simulación en programa Sketchup, Open Studio y Energy Plus.

Fuente: (Muños, 2016)

Una vez elegido el procedimiento de trabajo con Google Sketch Up 2016, Legacy Open Studio y Energy Plus, se abre un proyecto de varias etapas.

- **Diseño gráfico de la vivienda con Sketch Up.** Se da forma a la vivienda, proyectando la habitación o zona, constituyendo todas las superficies y subsuperficies que sean necesarias. Los elementos constructivos deben quedar registrados como variables dentro del programa Open Studio o sino en IDF Editor.
- **Introducción de variables en Open Studio.** Se emplea esta aplicación para añadir toda la caracterización que presentan los elementos constructivos ya creadas, como los materiales que los componen. Además se tienen que volcar todas las cargas térmicas que presenta el proyecto.

- **Cálculo de cargas térmicas.** Se lanza el archivo de Open Studio finalizado para que se realicen los cálculos de los flujos y consumos y así obtener resultados. En esta etapa se puede emplear también Energy Plus para añadir variables dentro del sistema que no sea posible hacer con Open Studio.

A continuación se va a hacer una instrucción básica para la edición y simulación realizado en cada etapa para llevar a cabo el proyecto final. Sin embargo, como detallar el funcionamiento de todos los comandos de Sketch Up y de Open Studio resultaría demasiado extenso y solamente se han escogido los parámetros que resultan primordiales para comprender el desarrollo del proceso de la simulación del desempeño térmico para las viviendas altoandinas.

- 1) Para este desarrollo va a consistir en la instalación de los programas Google Sketch Up 2016, Legacy Open Studio 1.10.0 y Energy Plus v.8.4.0, son de descarga gratuita y se encuentran fácilmente en sus correspondientes páginas web <https://energyplus.net>. Tal como se muestra en la figura 23.

Una característica importante de estos programas es que están internamente relacionados por medios de extensiones y plug-in, de forma que al instalar los dos, aparecen dentro de Sketch Up comandos adicionales que trabajan con variables de Open Studio, como son la creación de zonas o la introducción de zonas iluminadas o con sombras.

También aparecen funciones de Energy Plus una vez incluido sus **extensiones**, permitiendo exportar o importar archivos **idf** para trabajar con el propio motor de cálculo.

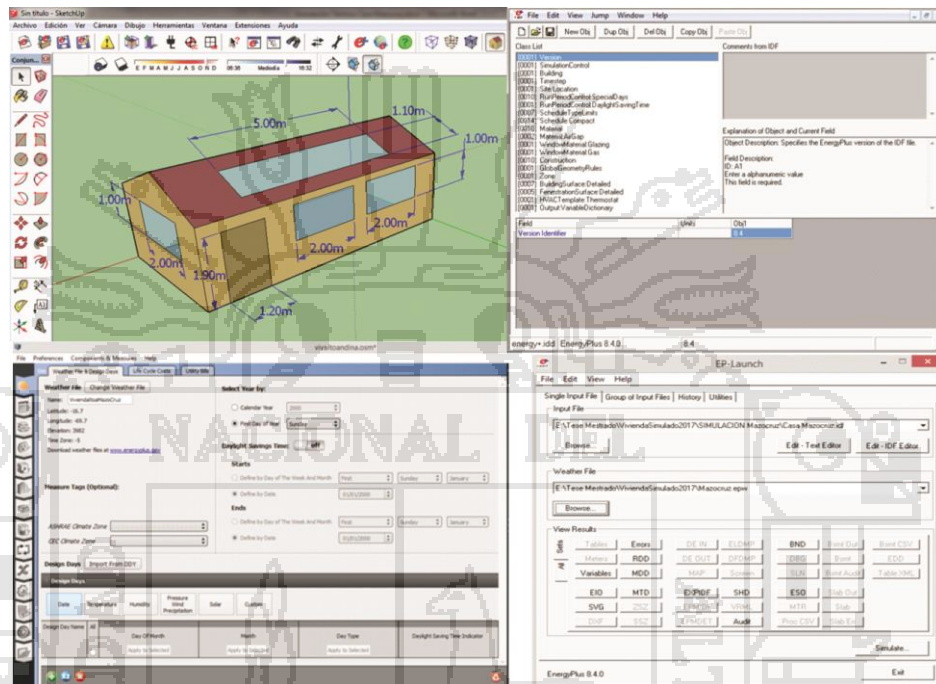


Figura 23. El proceso de simulación de la vivienda.

2) Se preparó los datos de condiciones iniciales y elaborar un modelo final para la simulación de la vivienda altoandina, así como dimensiones y geometrías de la vivienda, propiedades termofísicas de materiales de construcción y las condiciones climatológicas del lugar. Para mostrar el trabajo realizado en este apartado se muestran en apartados (2.8.3) se documentan los elementos introducidos y los cambios que presentan respecto al modelo real.

Cuadro 2. Elementos constructivos que son empleados en el modelo final para la simulación.

Nº	Material de construcción	Espesor [m]	Conductividad Térmica[W/mK]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/kgK]
MUROS					
1	Cemento (fachada ext.)	0.005	1.40		
2	Ladrillos	0.15	0.47		
3	Yeso (fachada int.)	0.005	0.23	800	1090
TECHO (cielo – raso)					
4	Carrizo-ichu	0.02			
5	Yeso	0.005	0.30		
6	Teja (fibro cemento)	0.004	0.18	1050	1550
SUELO					
7	Madera	0.015	0.14		
8	Tierra	0.15	0.52		
9	Piedra compactada	0.30	3.50	2800	
VENTANA					
10	Vidrio	0.005	1.028		
CLARABOYA					
11					
PUERTA					
12	Madera	0.010	0.14	510	1380

Fuente: Elaborado por el investigador.

- 3) Se utilizó la herramienta IDF Editor para generar todos los datos de entrada en los parámetros y subparámetros necesarios del modelo final que se va simular.
- 4) Al terminar, es necesario grabar el archivo utilizando la opción File y abrir el EP Lanch revisar en el fichero Single Input File finalmente efectuar la simulación utilizando el botón Simulate.
- 5) Para analizar y obtener los resultados del modelo se debe de ir al fichero Text Output Files.

3.2. TÉCNICAS Y ESTRATEGIAS

3.2.1. Técnica

La técnica que se utilizó en la presente investigación fue el estudio y la información real de las condiciones climáticas de la zona altoandina, esto implica, la información acerca de las condiciones de confort térmico asociadas al poblador andino. Con lo expuesto anteriormente se presenta una alternativa actual de mejora en el desempeño energético de las habitaciones, aportando técnicas hacia un diseño adecuado de viviendas y la selección de sus componentes que al interactuar con el clima tomen ventajas de el para lograr el bienestar térmico de sus ocupantes.

3.2.2. Estrategias

Las estrategias que se utilizaron para la presente investigación son las siguientes:

- Búsqueda de información de la materia objeto de investigación.
- Revisión de saberes previos necesarios bibliográficos o de internet que facilite en la comprensión e interpretación que se va a encarar.
- Consultas al asesor y a otros entendidos en la materia para consolidar las ideas desarrolladas a absolver dudas que se presentan.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

La vivienda es un elemento fundamental que caracteriza la calidad de vida, la accesibilidad, el entorno ambiental y el carácter único de una comunidad, contribuyendo a dar sentido al lugar. La forma en que las viviendas son diseñadas y construidas, el conjunto planeado y edificado y las áreas verdes y espacios abiertos localizados y conservados, son factores que determinan entre otros, si una comunidad es sustentable ambientalmente.

Una vivienda altoandina sostenible hace uso eficiente de la infraestructura existente, de la energía solar, los materiales de la envolvente de la vivienda. Ello, no solo para ahorrar recursos financieros, sino también para salvaguardar la salud, hacer una vivienda más confortable y proteger el medio ambiente y los recursos naturales.

El desarrollo sustentable de los recursos naturales, aplicado a la vivienda, implica la incorporación de nuevas exigencias a lo largo del proceso constructivo de la casa y un cambio en las técnicas y sistemas de construcción. Se requiere brindar la atención adecuada a la promoción y aplicación de prácticas concretas y reales para que dentro de la vivienda existan condiciones para el ahorro de la energía.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del diagnóstico realizada, tanto condiciones climatológicas, el desempeño térmico en la vivienda típica de la zona altoandina, y posteriormente se presenta el análisis del desempeño térmico de la vivienda propuesta mediante la simulación energética, lo cual justifica la necesidad de hacer el uso eficiente de la energía solar en la vivienda, para ello en el futuro alcanzar una gestión eficiente de los recursos energéticos, tanto en el desarrollo de nuevas formas de construcción de las viviendas.

4.2. DIAGNÓSTICO TÉRMICO A ESTUDIAR

4.2.1. Condiciones climáticas ambientales en lugar de estudio

Luego de evaluar las condiciones climáticas registradas en los lugares, se seleccionó los distritos de Ilave y Mazo cruz (Ilave, 16°9'S y 69°33'O, 3 871 msnm y Mazo cruz, 16°44'S y 69°42'O 3982 msnm) de la provincia de El Collao por ser la que presentó las condiciones ambientales más críticos (se registraron los mínimos de temperatura más bajos) en la época de invierno. A continuación se muestran las condiciones climáticas de la zona altoandina, el registro de temperaturas máximas y mínimas del ambiente en los días de los meses más fríos de la época de invierno del año 2016 (desde 01 de junio al

30 de agosto), tal como se observa en el Anexo 5, cuya gráfica correspondiente en la figura 24, además presentamos el registro de radiación solar horaria mensuales en los meses mencionados arriba, mencionada y se indican en la figura 25.

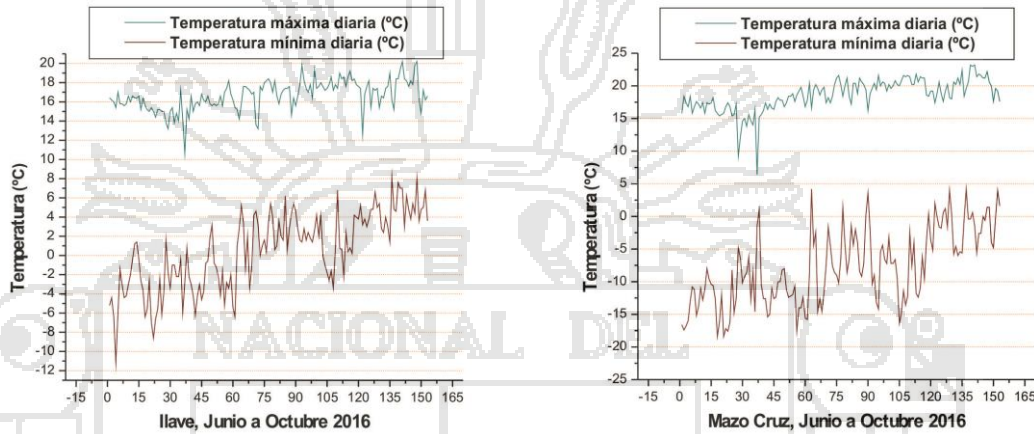


Figura 24. Condiciones climáticas en las zonas altoandinas de Ilave y en Mazo Cruz en los meses de junio a octubre del año 2016.

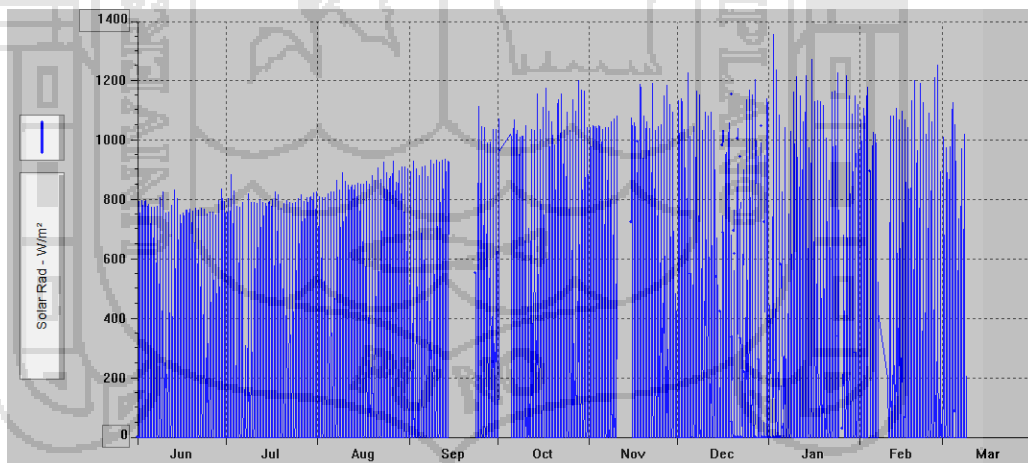


Figura 25. La radiación solar en la ciudad de puno a 3809 m.s.n.m. en la época de invierno del año 2016.

Discusiones

Durante los periodos de bajas temperaturas entre los meses Junio, Julio y agosto, los cuales muestran ser un problema recurrente, el tema de confort térmico en el contexto bioclimático actual (medio rural principalmente), en la zona altas de la región de Puno, en este caso el Distrito de Mazo Cruz ubicado sobre los 3982 m.s.n.m. y zonas circundantes, se hace notoria la gran carencia de información real de las condiciones climáticas en las que las poblaciones rurales andinas viven; esto implica, incluso, información acerca de las condiciones de confort térmico asociadas al poblador andino, el cual está sujeto a condiciones de clima frío durante casi toda su vida, en la figura 24 muestra la condición climática de temperatura mínimas de aire son de -11.2°C en Ilave y -16.0°C en Mazo Cruz, registrada el 04 de junio de año 2016, las condiciones de temperaturas máxima promedio son de 16°C en Ilave y 17.4°C en Mazo Cruz, al someterse en estas condiciones climáticas extremadamente frías, el poblador altoandino sufrirá como consecuencias ciertas problemas como mortandad por enfermedades respiratorias, restricción de actividades nocturnas, depresión, etc.

4.2.2. Condiciones térmicas Interiores de la vivienda típica altoandina diagnosticada, vivienda solar construida y la validación del modelo con programa Energy Plus

Para el diagnóstico del desempeño térmico de la vivienda típica seleccionada es ubicada en la región de Puno – El Collao, Ilave, en la Comunidad rural

Colloco (Latitud $16^{\circ} 9'$, su longitud $69^{\circ} 33'$, 3 868 m.s.n.m.), es evaluada en los días más desfavorables en la época de invierno y se muestra que las condiciones climáticas de temperatura ambiente mínima es de -3.87°C (04:00 horas del 27-06-2013), con una Humedad relativa de 2.5% y la velocidad del viento de 1.7m/s, así mismo se muestra que la temperatura promedio mínima del aire, registrada en el interior de la vivienda típica fue de 7.73°C (se dan aproximadamente desde 02.00 – 05:00 horas), esto implica que desde la media noche hasta las 05.00 horas las personas tienen que dormir en ambientes en condiciones críticas; es decir en temperaturas bajas. Así mismo se comprueba que a pesar que la radiación solar en la zona es: 500 a 800 W/m^2 en las 08:00 a 15:00 horas en promedio, lo que significa la irradiación solar diario acumulado promedio es de 5.5 kWh/m^2 día de energía diario acumulada, puesto que las viviendas no la aprovechan en la transferencia y acumulación de energía solar, (Flores, 2014).

Después de la construcción de la vivienda solar pasivo utilizando materiales termofísicas se aprecia los resultados del monitoreo final del desempeño térmico, específicamente la temperatura del aire en el interior de la vivienda para los días más desfavorables de época de invierno (19 de junio al 02 de julio de 2013), los mínimos promedios de temperatura registrada oscilan entre 12.74°C a 14.87°C , con respecto a la vivienda típica de la zona altoandina se observó un incremento mínimos promedios desde 7.73°C a 13.15°C . Estos resultados nos indican que las viviendas rurales de la región altoandina deben ser construidas con sistema de aislamiento térmico según, así obtener un

confort térmico en el interior de las viviendas, traduciéndose en una satisfacción y mejor calidad de vida de los habitantes, (Flores, 2014).

Simulación térmica y correlativa

En la actualidad es importante el manejo de herramientas computacionales para el análisis del comportamiento energético de las viviendas o en edificios, para poder proponer medidas de ahorro energético, por lo que en el presente trabajo se utilizó el software de simulación Energy Plus con la que se busca obtener un comportamiento térmico real del uso de la vivienda. Para validar los resultados experimentales, se ha utilizado el programa de simulación térmica arriba mencionada, al realizar las comparaciones de los valores medidos y simulados o calculados, comprobándose por el método correlativo, el factor de correlación fue $r=0.92575$ para los días de evaluación, este indicador muestra la confiabilidad del modelo.

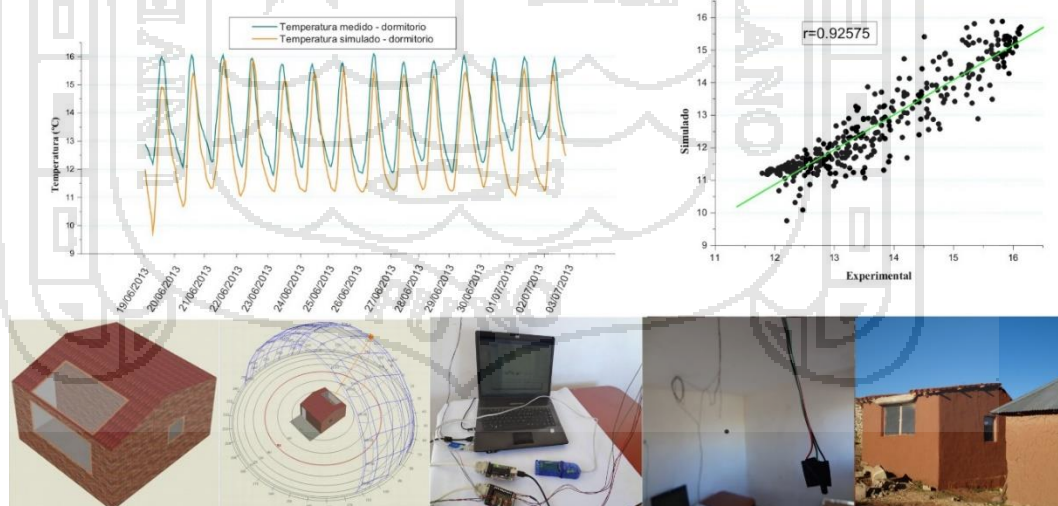


Figura 26. Comparación de resultados de temperatura simulado (modelo final) y medido (vivienda construida) y la correlación correspondiente.

Fuente: (Flores C., 2014).

4.3. SIMULACIÓN ENERGÉTICA Y ANÁLISIS DEL MODELO DE LA VIVIENDA ALTOANDINA SOSTENIBLE EN EL PROGRAMA ENERGY PLUS

En esta parte del capítulo se elabora el modelo que tendrá como variable la carga térmica. La carga variará dependiendo de los datos de entrada al ingresar en el programa para este caso de estudio. La simulación se ha realizado desde el menú disponible del programa EP-Launch con el archivo exportado a *idf*.

La salida de datos en Energy Plus se ha realizado mediante el programa EP-Launch en formato HTML. Con periodo de simulación de 2 meses de la época del invierno.

Una vez realizado el diagnóstico térmico se procedió a elaborar un modelo de la vivienda original en el software de simulación térmica en edificios Energy Plus 8,4; para ello se usó información adquirida (Senamhi, 2016) y la información registrada en la mini-estación meteorológica (Cs. Físico Matemáticas - UNAP), propiedades termofísicas de los materiales que conformaban muros, techos, etc. (datos obtenidos de la bibliografía) y la geometría de la vivienda (obtenido de los planos).

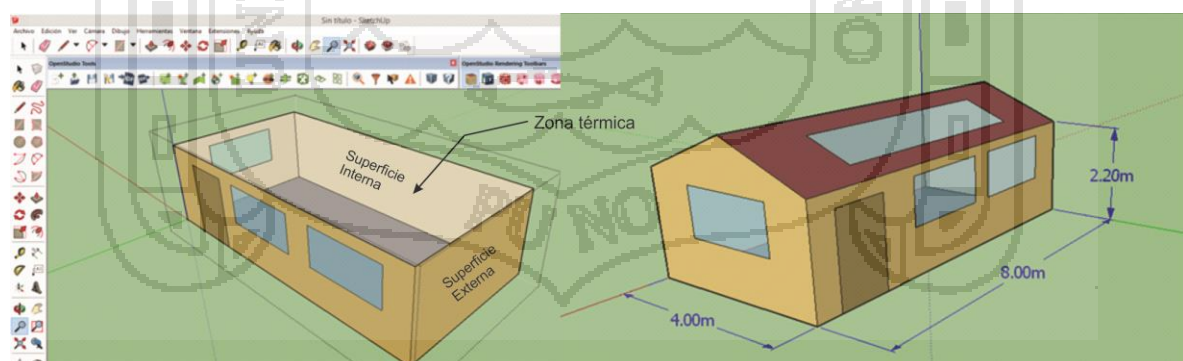


Figura 27. Vista del modelo final de la vivienda altoandina generadas en el entorno gráfico google Sketchup.

Fuente: Base de datos del investigador.

A continuación se muestra el aislamiento térmico (envolvente) asociado a cada elementos constructivas propuestas de la vivienda altoandina, para zonas altas de la región de Puno.

Cuadro 3. Transmitancias térmicas por componentes de la envolvente.

Construcción	Material	Espesor (m)	Conductividad k (W/m°C)	e/k (m ² °C/W)	Transmitancia U (W/m ² °C)	Transf. Calor UA (W/°C)
Paredes						
	Cemento arena	0.005	1.40	0.004		
	Ladrillo king kong	0.150	0.47	0.319		
	Yeso	0.005	0.30	0.017		
	1/hi+1/he			0.170	5.28	251.94
Ventana						
	Vidrio simple	0.005	0.8	0.0063		
	1/hi+1/he			0.1700	5.67	34.04
Puerta						
	Madera Capirona	0.010	0.23	0.043		
	1/hi+1/he	-	-	0.170	4.68	10.68
Piso						
	Tierra	0.150	0.52	0.288		
	Piedra	0.300	3.5	0.086		
	Madera	0.015	0.15	0.100		
	1/hi+1/he	-	-	0.22	1.44	46.10
Techo						
	Fibro cemento	0.0040	0.22	0.018		
	Aire (cámara de aire)	-	-	0.160		
	lchu	0.020	0.090	0.222		
	Carrizo (capa de aire)	0.020	0.0246	0.813		
	Yeso	0.005	0.3	0.017		
	1/hi+1/he	-	-	0.140	0.73	21.14

Fuente: Base de datos del investigador.

Análisis y Discusiones

En el cuadro 3, los aislamientos incluidos en la envolvente de la vivienda altoandina propuesta, es oportuno mencionar que el techo aislante propuesto posee una transmitancia térmica de $0.73\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ este valor es similar a los aislamiento térmicos de techo propuestos por las normativas portuguesas, según se indica en una tabla de la sección antecedentes internacionales.

La transmitancia térmica U es una característica específica de un elemento constructivo, como la pared o un techo, y depende de la conductividad térmica y la geometría de los materiales que lo componen, así como de la radiación térmica y convección en las superficies del elemento. Se utiliza entre otros, para determinar las pérdidas de calor de una vivienda a través de los elementos que componen la envolvente, (Flores, 2014). Según el cuadro 3, podemos observar que:

- Cuanto mayor sea la transmitancia térmica, menor es el efecto de aislamiento térmico del elemento, y mayor es la pérdida de calor del elemento.
- Cuanto menor sea el valor U , mejor es la aislación térmica y menor es la pérdida de calor a través del elemento.

A la hora de construir una vivienda de consumo casi nulo, el papel del aislamiento térmico es, creo, indiscutible. Por otro lado, los valores de transmitancia térmica máximos exigidos por el CTE en España son bastante más altos (menos exigentes) que los impuestos, no sólo en países nórdicos o centroeuropeos, sino en países más cercanos a nosotros, como Francia, Italia y Portugal.

Si queremos conseguir edificios de consumo casi nulo, (Fernandez, 2012), es casi seguro que tengamos que variar las costumbres, y recurrir a mayores espesores de aislamiento en nuestros cerramientos.

Por lo tanto, el aislante ideal tendría un valor $U = 0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, es decir no se transmite calor. Los valores U más altos están cerca de $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y caracterizan los elementos con muy *mala aislación térmica*. Las nuevas construcciones para zonas altas donde la condición climática son, tal como se aprecia en la figura 24, se debe de tomar en cuenta esta propiedad importante que es la transmitividad térmica.

Por otro lado, Las ganancias solares pueden conseguirse directamente de la correcta orientación de la vivienda, de su adecuada distribución, y de los sistemas de captación, fundamentalmente de la relación entre radiación incidente, superficie de captura, superficie útil, capacidad de almacenamiento (inercia térmica) y pérdidas por transmisión (aislamiento).

4.3.1. Desempeño térmico de la vivienda altoandina simulada

Posteriormente presentamos un análisis de comportamiento térmico de la vivienda altoandina sustentable propuesto para zona altas del distrito de Mazo Cruz – Ilave; así como la comparación de la temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) medido del ambiente exterior y simulado para el ambiente interior de la vivienda altoandina y también humedad relativa (HR) medido (ambiente exterior) y simulado (ambiente interna), evaluado durante los meses más fríos de la época de invierno, desde 01 de junio al 30 de agosto del 2016.

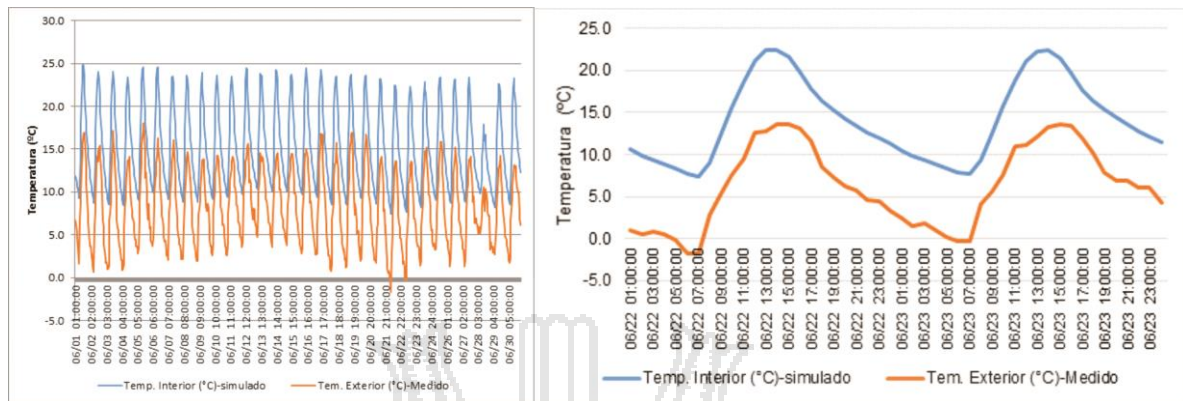


Figura 28. Temperaturas (°C) simuladas y medidas para el aire del ambiente de la vivienda altoandina sostenible en el mes de junio de 2016.

Fuente: Elaborado por el investigador.

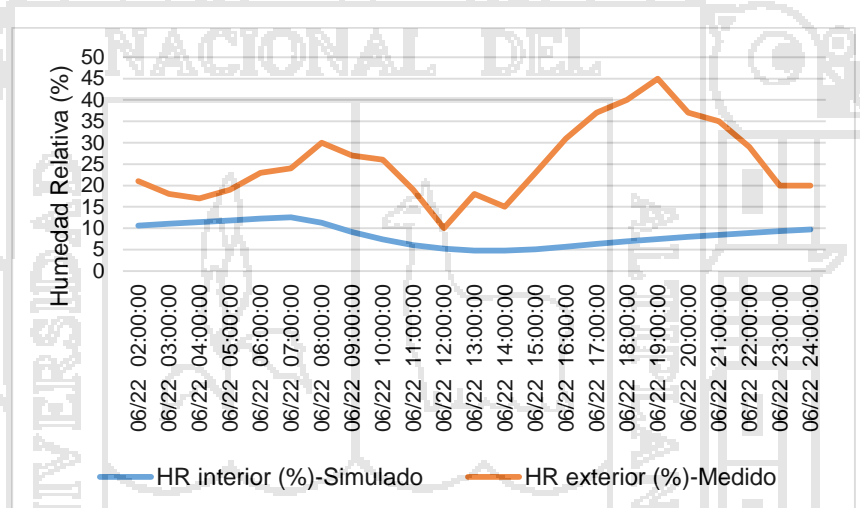


Figura 29. Humedad relativa HR (%) simulada y medido del aire del ambiente de la vivienda altoandina sostenible en el mes de junio de 2016.

Fuente: Elaborado por el investigador.

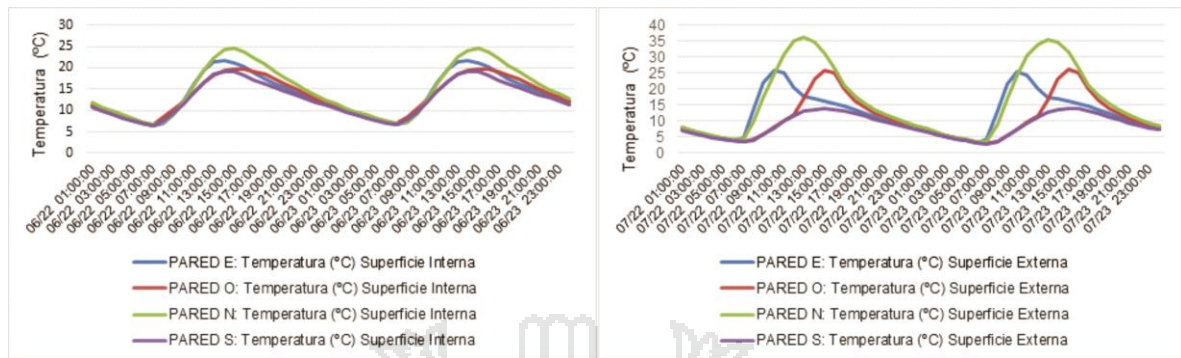


Figura 30. Temperatura simulada en las superficies internas y externas de las paredes de la vivienda altoandina.

Fuente: Elaborado por el investigador.

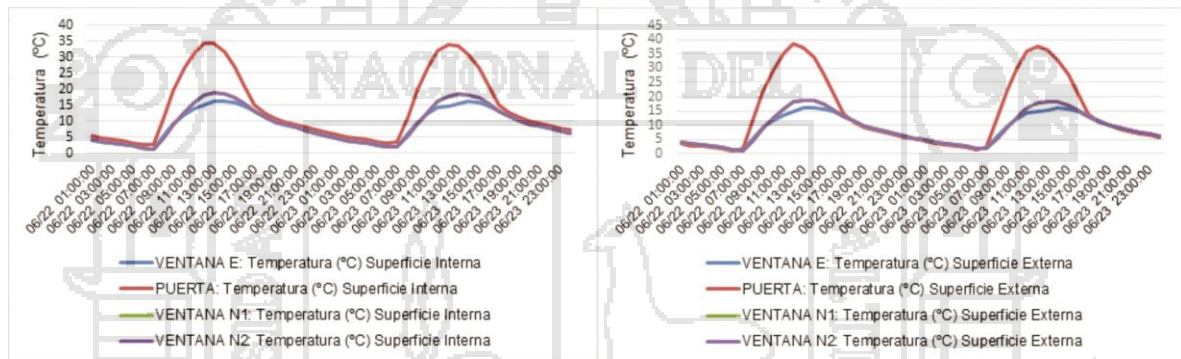


Figura 31. Temperaturas simuladas en las superficies internas y externas de puertas y ventanas de la vivienda altoandina sostenible.

Fuente: Elaborado por el investigador.

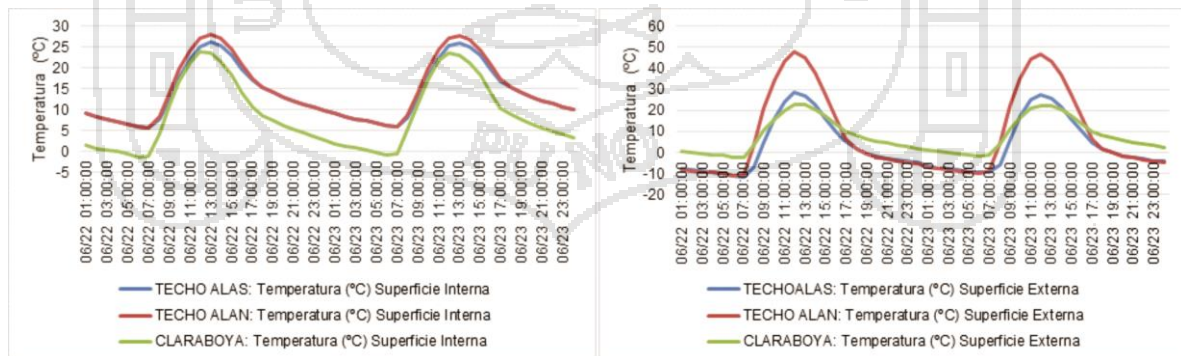


Figura 32. Temperatura simulada en las superficies internas y externas en el techo de la vivienda altoandina sostenible.

Fuente: Elaborado por el investigador.

Observación. Los base de datos climatológicos usados para la simulación de la vivienda fue de la estación meteorológica de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas – UNA – Puno (elevación: 3 809 m.s.n.m.), por carencia de información real meteorológica y por falta de equipos sofisticados de estación meteorológica en el lugar de estudio.

Discusiones

El uso del principio de Balance de Energía en la simulación como modelo matemático es consistente para obtener una carga térmica o el desempeño térmico favorable para las viviendas altoandinas y se aprecia que el comportamiento térmico de los materiales constructivos, muestran que el sistema constructivo en la envolvente se adapta perfectamente a las condiciones de confort térmico para lugares ubicados sobre los 3 800 m.s.n.m.; teniendo en cuenta los criterios y aspectos arquitectónicos de diseño como la ubicación, orientación, geometría y la fuente de energía.

Los valores de desempeño térmico de la vivienda simulada se analizó para los días más frías apreciando la temperatura mínima del aire externa de -1.70°C de los meses de época de invierno ocurrido a 05:00 horas del 22 de junio de año 2016, se observa las temperaturas en la superficie externa y en la superficie interna de la envolvente del modelo final de la vivienda simulada (figura 27), tal como se muestran en las figuras: 30, 31 y 32. La temperatura promedio mínimo para el día 22 de junio del año 2016 fue de 11°C (desde 01:00 a 06:00 horas y desde 20:00 a 24:00 horas), mientras que la temperatura

promedio del ambiente externa fue 2.24°C; y una temperatura promedio máximo de 17.7°C (desde 07.00 a 19:00); estos resultados a comparación del desempeño de la vivienda típica diagnosticada y la vivienda pasivo construida (apartado 4.2.2), de aquí podemos observar que las viviendas para las zonas altoandinas consiste en aislar adecuadamente la envolvente de la vivienda y luego aprovechar la radiación solar directa.



CONCLUSIONES

- La vivienda simulada propuesta para zonas rurales altoandinas, cumpliendo los criterios y los aspectos arquitectónicos del diseño. Obteniendo el desempeño térmico de temperaturas promedio mínimo de 11°C y temperatura promedio máxima de 17.7°C en el interior de la vivienda simulada, y a una temperatura promedio mínima en el ambiente externa de 2.24°C .
- Con el uso del método de balances globales de energía en la simulación energética modelan matemáticamente una habitación altoandina para obtener el desempeño térmico en viviendas altoandinas sostenibles propuestas en la Provincia de El Collao.
- El modelo matemático expuesto brinda resultados del desempeño térmico favorable en la simulación para una habitación sostenible con diferentes configuraciones aplicado a climas locales altoandinas.
- La necesidad de manejar programas de simulación energética en edificaciones, siendo su uso una de las herramientas más importantes al momento de decidir por una u otra opción de construcción, para obtener el

ambiente cálido en el interior de las viviendas, traducándose en una satisfacción y mejor calidad de vida de los habitantes.



RECOMENDACIONES

- En la actualidad es importante el manejo de herramientas computacionales para el análisis del comportamiento energético de los edificios, para poder proponer medidas de ahorro energético, porque de acuerdo a estudios internacionales, los edificios consumen una buena parte de la energía total producida en un país, ya sea para su iluminación, operación de sistemas de ventilación, calefacción, aire acondicionado y sistemas electrónicos.
- Para proyectos futuros se debe de considerar como un estudio de las capacidades del programa Energy Plus como herramienta para simulación en una certificación energética, puesto que es basado al método de balance de energía.
- Con el modelo matemático empleado para el cálculo de la carga térmica, sería posible implementar soluciones analíticas para configuraciones de superficie simples o métodos numéricos que hagan el cálculo para cualquier tipo de geometría.

- Para trabajos futuros se recomienda realizar proyectos de eficiencia energética que es el ahorro energético, y se considera tanto como el ahorro económico en consumo de energía. Para una condición climática de temperatura mínimas de -11.2°C (Ilave) y -16.0°C (Mazo Cruz), se recomienda que la vivienda rural altoandina debe ser aislado adecuadamente la envolvente de la vivienda y luego aprovechar la radiación solar directa para distribuir en materiales acumuladores de calor.





BIBLIOGRAFÍA

- Ashrae, E. R. (2012). *Handbook of fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning*. USA.
- Ayres, J. y. (1995). *Historical development of building energy calculations*.
- Blocken, B. y. (2000). Driving rain on building envelopes-I. Numerical estimation and full-scale experimental verification. *Journal of Building Physics*, 24(1):61-85.
- Bravo Muñoz, V. (2016). *Tesis: Metodología para la simulación energética de un edificio terciario empleando la herramienta Energy Plus*. Madrid.
- Chapman, A. J. (1974). Madrid: BELLISCO, Tercera edición.
- Churchill, S., & Chu, H. (1975). *Correlating equations for laminar and turbulent freeconvection from a avertical plate*. USA.
- Dos Santos, G. y. (2009). Combined heat, air and moisture (HAM) transfer model for porous building materials. *Journal of Building Physics*, 32(3):203-220.
- Espinoza, R., & Huaylla, F. (2009). Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú. *AVERMA*, Vol.13.
- Fernandez Salvador, V. (2012). Simulación energética de una vivienda de consumo casi nulo. *Revista de Ingeniería Energética Dyna*.
- Fernandez Salvador, V. (2012). Simulación Energética de una viviendaa de consumo casi nulo con Energy Plus. *Energía y Sustentabilidad*, 1-16.
- Flores C., A. (2014). Construcción de una vivienda en base a propiedades termofísicas y evaluación de su confort térmico. *Revista de Investigación Aloandina*, 177 - 185.

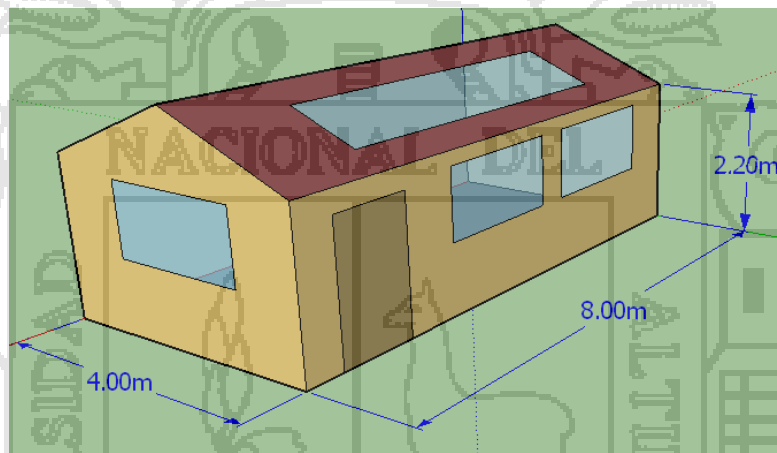
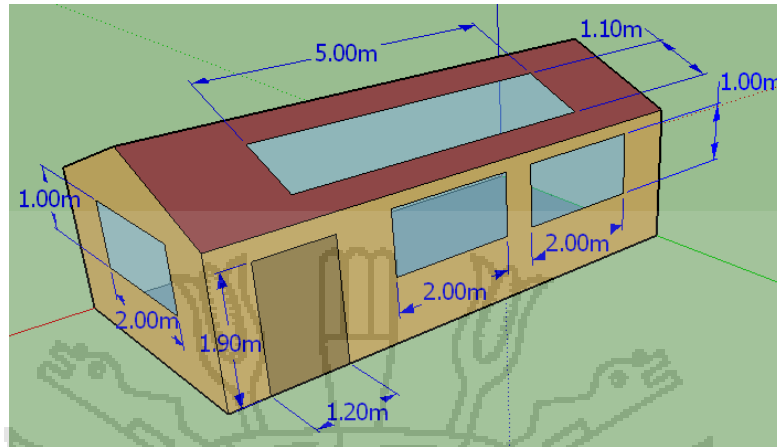
- G.K., B. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge: University.
- Galbraith, G. L. (2001). Evaluation of discretized transport properties for numerical modelling of heat and moisture transfer in buildings structures. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 24(3):240 { 260.
- Gonçalves, H. (2004). *Conceitos Bioclimaticos para os Edifícios em Portugal*. Lisboa: Ineti.
- Hensen, J. (1991). *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*.
- Ibañes P., R. J. (2015). *Tecnología solar*. Madrid: Muldiprensa.
- Incropera, F. y. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall.
- Kreider, J. (1994). *Heating and cooling of buildings: design for efficiency*. New York: McGraw Hill.
- Kreith, F. (1970). *Principios de transferencia de calor*. México: SUCESORES, S.A.
- Maureen Trebilcock, K. (2012). Análisis energético de las viviendas del centro - sur de Chile. *Arquitecturarevista*, 62-75.
- Mohiuddin Syed, A. (2007). *A study of thermal behavior of fibrous insulation*. Tesis de Doctorado, The Faculty of Graduate School Tennessee Technological University.
- Muñoz Veneros, D. (2003). *Arquitectura ecológica sustentable*.
- Nacif Hartley, J. (2011). *Tesis: Acumulación térmica para un sistema solar de calefacción activo*. Chile.
- Olgay, V. (2002). *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili, 2da Ed.
- Palyvos, J. (2008). A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems modelling. *Applied Thermal Engineering*.
- Pedersen, C. F. (1997). *Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads*.
- Quesada Molina, F. (2014). Método de certificación sustentable de viviendas. *Revista: Vivienda sustentable*.
- reference, E. e. (2012). *The reference to EnergyPlus Calculations*. USA.
- Reference, E. E. (2016). *The Reference to EnergyPlus Calculations*. EE.UU.
- Senamhi. (2016). Puno.
- Soto Espinoza, R. E. (2012). *Tesis: Desarrollo de un código computacional para el cálculo dinámico de cargas térmicas en edificaciones*.

- Taylor, R. P. (1990). Simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programas. *En Proceedings of the 3rd International Conference on System Simulation in Buildings*. Liege, Belgium.
- Underwood, C. y. (2004). *Modelling methods for energy in buildings*. Blackwell Science.
- Vera, S. y. (2002). Evañuación de desempeño térmico y energético de una vivienda social en Chile, utilizando un software de simulación de energía de edificios. *Revista: Ingeniería de Construcción*, Vol 17.
- Welty, J. R. (1963). *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Limusa.
- Woloszyn, M. y. (2008). Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. *Building Simulation*.





Anexo 1. Dimensiones de la vivienda altoandina sostenible propuesta simulada

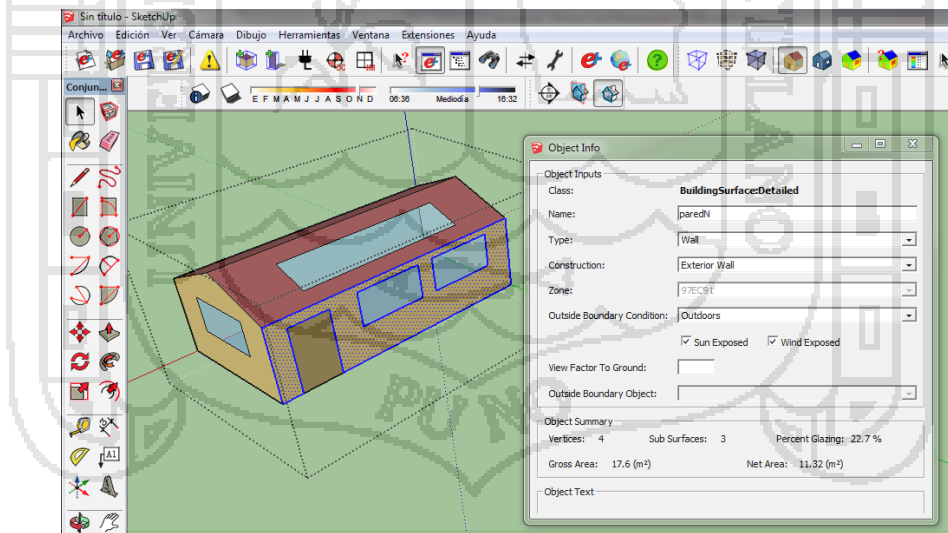


MUROS	Nº	Largo	Altura	Área	Espesor
Norte	1	8m	2.20m	11.32	0.015m
Sur	1	8m	2.20m	17.6	0.015m
Este	1	4m	2.20m	8.46	0.015m
Oriente	1	4m	2.20m	10.46	0.015m
VENTANAS	Nº	Largo (m)	Altura	Área	Espesor
Norte	2	2m	1m	2m ²	0.003m
Este	1	2m	1m	2m ²	0.003m
PUERTA	Nº	Largo	Altura	Área	Espesor
Norte	1	1.20m	1.90m	2.28 m ²	0.010m
TECHO	Nº	Largo	Altura-ancho	Área	Espesor
Claraboya (Orient-norte)	1	5m	1.10m	5.5 m ²	0.00175m
PISO		8m	4m	32 m²	

Anexo 2. Configuración de la envolvente considerada para la simulación de la vivienda

Construcción	Material	Conductividad k (W/m°C)	Densidad (kg/m3)	Calor específico (J/kgK)
Paredes				
	Cemento arena	1.40	2000	1000
	Ladrillo king kong	0.47	1000	930
	Yeso	0.30	800	1000
Ventana				
	Vidrio simple	0.8	-	-
Marco ventana				
	Madera	0.18	664	1600
Puerta				
	Madera Capirona	0.23	800	1600
Piso				
	Tierra	0.52	2000	1840
	Piedra	3.5	2800	1000
	Madera	0.15	450	1600
Techo				
	Fibrocemento	0.22	1000	1500
	Aire (cámara de aire)	-	-	-
	Ichu	0.090	270	900
	Carrizo (capa de aire)	0.025	0.798	1006.5
	Yeso	0.3	800	1000

Anexo 3. Creación de la geometría de la vivienda altoandina sostenible (edición de superficies y subsuperficies) en: Sketchup-Legacy, Open Studio



Anexo 4. Entradas de datos en IDF Editor, visto en fichero Text Output Files

A continuación se presenta (en formato de texto y en forma resumida), todas las entradas para el programa. Los comentarios que van entre signos de exclamación no son leídas por EP, pero el editor IDF los genera automáticamente en el archivo:

```

!-Generator IDFEditor 1.47
!-Option SortedOrder

!-NOTE: All comments with '!-' are ignored by the IDFEditor and are generated automatically.
!- Use '!' comments if they need to be retained when using the IDFEditor.

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: VERSION =====
Version,
  8.4;      !- Version Identifier

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SIMULATIONCONTROL =====
SimulationControl,
  No,      !- Do Zone Sizing Calculation
  No,      !- Do System Sizing Calculation
  No,      !- Do Plant Sizing Calculation
  No,      !- Run Simulation for Sizing Periods
  Yes;     !- Run Simulation for Weather File Run Periods

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDING =====
Building,
  Vivienda Maz-Puno, !- Name
  0.0,      !- North Axis {deg}
  City,     !- Terrain
  0.04,     !- Loads Convergence Tolerance Value
  0.4,      !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}
  FullInteriorAndExterior, !- Solar Distribution
  25,      !- Maximum Number of Warmup Days
  ;        !- Minimum Number of Warmup Days

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: TIMESTEP =====
Timestep,
  4;      !- Number of Timesteps per Hour

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SITE:LOCATION =====
Site:Location,
  Mazocruz-Puno,      !- Name
  -16.74,             !- Latitude {deg}
  -69.72,             !- Longitude {deg}
  -5.0,              !- Time Zone {hr}
  3982;              !- Elevation {m}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: RUNPERIOD =====
RunPeriod,
  Jun-Ago,          !- Name
  6,                !- Begin Month
    
```

1, !- Begin Day of Month
 8, !- End Month
 30, !- End Day of Month
 UseWeatherFile, !- Day of Week for Start Day
 Yes, !- Use Weather File Holidays and Special Days
 Yes, !- Use Weather File Daylight Saving Period
 No, !- Apply Weekend Holiday Rule
 Yes, !- Use Weather File Rain Indicators
 Yes, !- Use Weather File Snow Indicators
 1, !- Number of Times Runperiod to be Repeated
 Yes; !- Increment Day of Week on repeat

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====

Material,
 ichu, !- Name
 Rough, !- Roughness
 0.02, !- Thickness {m}
 0.09, !- Conductivity {W/m-K}
 270, !- Density {kg/m3}
 900, !- Specific Heat {J/kg-K}
 0.9, !- Thermal Absorptance
 0.7, !- Solar Absorptance
 0.7; !- Visible Absorptance

Material,
 capa de aire 2cm, !- Name
 VerySmooth, !- Roughness
 0.02, !- Thickness {m}
 0.0246, !- Conductivity {W/m-K}
 0.798, !- Density {kg/m3}
 1006.5; !- Specific Heat {J/kg-K}

Material,
 cemento arena, !- Name
 Rough, !- Roughness
 0.005, !- Thickness {m}
 1.4, !- Conductivity {W/m-K}
 2000, !- Density {kg/m3}
 1000, !- Specific Heat {J/kg-K}
 0.9, !- Thermal Absorptance
 0.7, !- Solar Absorptance
 0.7; !- Visible Absorptance

Material,
 ladrillo kingkong, !- Name
 Rough, !- Roughness
 0.15, !- Thickness {m}
 0.47, !- Conductivity {W/m-K}
 1000, !- Density {kg/m3}
 930, !- Specific Heat {J/kg-K}
 0.9, !- Thermal Absorptance
 0.7, !- Solar Absorptance
 0.7; !- Visible Absorptance

Material,
 yeso, !- Name
 MediumRough, !- Roughness
 0.005, !- Thickness {m}
 0.3, !- Conductivity {W/m-K}
 800, !- Density {kg/m3}
 1000, !- Specific Heat {J/kg-K}
 0.9, !- Thermal Absorptance
 0.7, !- Solar Absorptance
 0.7; !- Visible Absorptance

Material,
 madera puerta1cm, !- Name

```

MediumSmooth,      !- Roughness
0.01,              !- Thickness {m}
0.23,              !- Conductivity {W/m-K}
800,               !- Density {kg/m3}
1600,              !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,               !- Thermal Absorptance
0.7,               !- Solar Absorptance
0.7;               !- Visible Absorptance

Material,
tierra,            !- Name
Rough,             !- Roughness
0.15,              !- Thickness {m}
0.52,              !- Conductivity {W/m-K}
2000,              !- Density {kg/m3}
1840,              !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,               !- Thermal Absorptance
0.7,               !- Solar Absorptance
0.7;               !- Visible Absorptance

Material,
piedra,            !- Name
Rough,             !- Roughness
0.3,               !- Thickness {m}
3.5,               !- Conductivity {W/m-K}
2800,              !- Density {kg/m3}
1000,              !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,               !- Thermal Absorptance
0.7,               !- Solar Absorptance
0.7;               !- Visible Absorptance

Material,
madera piso,      !- Name
MediumSmooth,     !- Roughness
0.015,            !- Thickness {m}
0.15,              !- Conductivity {W/m-K}
450,               !- Density {kg/m3}
1600,              !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,               !- Thermal Absorptance
0.7,               !- Solar Absorptance
0.7;               !- Visible Absorptance

Material,
fibrocemento,     !- Name
MediumRough,      !- Roughness
0.004,            !- Thickness {m}
0.22,              !- Conductivity {W/m-K}
1000,              !- Density {kg/m3}
1500,              !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,               !- Thermal Absorptance
0.7,               !- Solar Absorptance
0.7;               !- Visible Absorptance

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL:AIRGAP =====

Material:AirGap,
camara aire techo, !- Name
0.16;              !- Thermal Resistance {m2-K/W}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: WINDOWMATERIAL:GLAZING =====

WindowMaterial:Glazing,
Clear 3mm,         !- Name
SpectralAverage,   !- Optical Data Type
,                  !- Window Glass Spectral Data Set Name
0.003,            !- Thickness {m}
0.837,            !- Solar Transmittance at Normal Incidence
    
```


0.075, !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence
 0.075, !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
 0.898, !- Visible Transmittance at Normal Incidence
 0.081, !- Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence
 0.081, !- Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence
 0, !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
 0.84, !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
 0.84, !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
 0.9; !- Conductivity {W/m-K}

WindowMaterial:Glazing,

Polipropileno Clarab., !- Name
 SpectralAverage, !- Optical Data Type
 , !- Window Glass Spectral Data Set Name
 0.00175, !- Thickness {m}
 0.8, !- Solar Transmittance at Normal Incidence
 0.079, !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence
 0.079, !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
 0.8, !- Visible Transmittance at Normal Incidence
 0.079, !- Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence
 0.079, !- Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence
 0, !- Infrared Transmittance at Normal Incidence
 0.84, !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity
 0.84, !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity
 0.126, !- Conductivity {W/m-K}
 0.85, !- Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance
 Yes; !- Solar Diffusing

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====

Construction,
 paredes casa, !- Name
 cemento arena, !- Outside Layer
 ladrillo kingkong, !- Layer 2
 yeso; !- Layer 3

Construction,
 piso casa, !- Name
 tierra, !- Outside Layer
 piedra, !- Layer 2
 madera piso; !- Layer 3

Construction,
 techo casa, !- Name
 fibrocemento, !- Outside Layer
 camara aire techo, !- Layer 2
 ichu, !- Layer 3
 capa de aire 2cm, !- Layer 4
 yeso; !- Layer 5

Construction,
 ventana casa, !- Name
 Clear 3mm; !- Outside Layer

Construction,
 puerta casa, !- Name
 madera puerta1cm; !- Outside Layer

Construction,
 claraboya casa, !- Name
 Polipropileno Clarab.; !- Outside Layer

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: GLOBALGEOMETRYRULES =====

GlobalGeometryRules,
 UpperLeftCorner, !- Starting Vertex Position
 Counterclockwise, !- Vertex Entry Direction

Relative; !- Coordinate System

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONE =====

Zone,
 Casa Maz. Puno, !- Name
 0.0, !- Direction of Relative North {deg}
 0.0, !- X Origin {m}
 0.0, !- Y Origin {m}
 -0.260792, !- Z Origin {m}
 , !- Type
 1; !- Multiplier

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: BUILDINGSURFACE:DETAILED =====

BuildingSurface:Detailed,
 piso, !- Name
 Floor, !- Surface Type
 piso casa, !- Construction Name
 Casa Maz. Puno, !- Zone Name
 Ground, !- Outside Boundary Condition
 , !- Outside Boundary Condition Object
 NoSun, !- Sun Exposure
 NoWind, !- Wind Exposure
 0.0, !- View Factor to Ground
 4, !- Number of Vertices
 8.000000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
 4.000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
 0.260792000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
 8.000000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
 0.000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
 0.260792000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
 0.000000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
 0.000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
 0.260792000000, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
 0.000000000000, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
 4.000000000000, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
 0.260792000000; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,
 paredE, !- Name
 Wall, !- Surface Type
 paredes casa, !- Construction Name
 Casa Maz. Puno, !- Zone Name
 Outdoors, !- Outside Boundary Condition
 , !- Outside Boundary Condition Object
 SunExposed, !- Sun Exposure
 WindExposed, !- Wind Exposure
 , !- View Factor to Ground
 5, !- Number of Vertices
 8.000000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
 0.000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
 2.460792000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
 8.000000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
 0.000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
 0.260792000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
 8.000000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
 4.000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
 0.260792000000, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
 8.000000000000, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
 4.000000000000, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
 2.460792000000, !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
 8.000000000000, !- Vertex 5 X-coordinate {m}
 2.000000000000, !- Vertex 5 Y-coordinate {m}
 3.260792000000; !- Vertex 5 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,

```

paredO,      !- Name
Wall,        !- Surface Type
paredes casa, !- Construction Name
Casa Maz. Puno, !- Zone Name
Outdoors,    !- Outside Boundary Condition
,            !- Outside Boundary Condition Object
SunExposed,  !- Sun Exposure
WindExposed, !- Wind Exposure
,            !- View Factor to Ground
5,           !- Number of Vertices
0.000000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
4.000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.460792000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
4.000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0.260792000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
0.260792000000, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.460792000000, !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 5 X-coordinate {m}
2.000000000000, !- Vertex 5 Y-coordinate {m}
3.260792000000; !- Vertex 5 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,
techoAlaS,  !- Name
Roof,       !- Surface Type
techo casa, !- Construction Name
Casa Maz. Puno, !- Zone Name
Outdoors,   !- Outside Boundary Condition
,           !- Outside Boundary Condition Object
SunExposed, !- Sun Exposure
WindExposed, !- Wind Exposure
,           !- View Factor to Ground
4,          !- Number of Vertices
0.000000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
2.000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
3.260792000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
2.460792000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
8.000000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
2.460792000000, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
8.000000000000, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
2.000000000000, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
3.260792000000; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

BuildingSurface:Detailed,
paredN,     !- Name
Wall,       !- Surface Type
paredes casa, !- Construction Name
Casa Maz. Puno, !- Zone Name
Outdoors,   !- Outside Boundary Condition
,           !- Outside Boundary Condition Object
SunExposed, !- Sun Exposure
WindExposed, !- Wind Exposure
,           !- View Factor to Ground
4,          !- Number of Vertices
8.000000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
4.000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.460792000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
8.000000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
4.000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0.260792000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
0.000000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
4.000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}

```

```
0.260792000000,    !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0.000000000000,    !- Vertex 4 X-coordinate {m}
4.000000000000,    !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.460792000000;    !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
```

BuildingSurface:Detailed,

```
paredS,            !- Name
Wall,              !- Surface Type
paredes casa,     !- Construction Name
Casa Maz. Puno,   !- Zone Name
Outdoors,         !- Outside Boundary Condition
,                 !- Outside Boundary Condition Object
SunExposed,       !- Sun Exposure
WindExposed,      !- Wind Exposure
,                 !- View Factor to Ground
4,                !- Number of Vertices
0.000000000000,   !- Vertex 1 X-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.460792000000,   !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 2 X-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0.260792000000,   !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
8.000000000000,   !- Vertex 3 X-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
0.260792000000,   !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
8.000000000000,   !- Vertex 4 X-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.460792000000;   !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
```

BuildingSurface:Detailed,

```
techoAlaN,        !- Name
Roof,             !- Surface Type
techo casa,       !- Construction Name
Casa Maz. Puno,   !- Zone Name
Outdoors,         !- Outside Boundary Condition
,                 !- Outside Boundary Condition Object
SunExposed,       !- Sun Exposure
WindExposed,      !- Wind Exposure
,                 !- View Factor to Ground
4,                !- Number of Vertices
8.000000000000,   !- Vertex 1 X-coordinate {m}
2.000000000000,   !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
3.260792000000,   !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
8.000000000000,   !- Vertex 2 X-coordinate {m}
4.000000000000,   !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
2.460792000000,   !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 3 X-coordinate {m}
4.000000000000,   !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
2.460792000000,   !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0.000000000000,   !- Vertex 4 X-coordinate {m}
2.000000000000,   !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
3.260792000000;   !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: FENESTRATIONSURFACE:DETAILED =====

FenestrationSurface:Detailed,

```
ventanaE,         !- Name
Window,          !- Surface Type
ventana casa,    !- Construction Name
paredE,          !- Building Surface Name
,                !- Outside Boundary Condition Object
,                !- View Factor to Ground
,                !- Shading Control Name
,                !- Frame and Divider Name
,                !- Multiplier
4,               !- Number of Vertices
8.000000000000,   !- Vertex 1 X-coordinate {m}
1.000000000000,   !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
```

```

2.260792000000,    !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
8.000000000000,    !- Vertex 2 X-coordinate {m}
1.000000000000,    !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
1.260792000000,    !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
8.000000000000,    !- Vertex 3 X-coordinate {m}
3.000000000000,    !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
1.260792000000,    !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
8.000000000000,    !- Vertex 4 X-coordinate {m}
3.000000000000,    !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.260792000000;    !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
    
```

FenestrationSurface:Detailed,

```

claraboya,          !- Name
Window,             !- Surface Type
claraboya casa,     !- Construction Name
techoAlaN,         !- Building Surface Name
,                   !- Outside Boundary Condition Object
,                   !- View Factor to Ground
,                   !- Shading Control Name
,                   !- Frame and Divider Name
,                   !- Multiplier
4,                  !- Number of Vertices
6.500000000000,    !- Vertex 1 X-coordinate {m}
2.514437294584,    !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
3.055017082166,    !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
6.500000000000,    !- Vertex 2 X-coordinate {m}
3.535761654557,    !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
2.646487338177,    !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
1.500000000000,    !- Vertex 3 X-coordinate {m}
3.535761654557,    !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
2.646487338177,    !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
1.500000000000,    !- Vertex 4 X-coordinate {m}
2.514437294584,    !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
3.055017082166;    !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
    
```

FenestrationSurface:Detailed,

```

puerta,            !- Name
Door,              !- Surface Type
puerta casa,       !- Construction Name
paredN,           !- Building Surface Name
,                  !- Outside Boundary Condition Object
,                  !- View Factor to Ground
,                  !- Shading Control Name
,                  !- Frame and Divider Name
,                  !- Multiplier
4,                 !- Number of Vertices
7.400000000000,    !- Vertex 1 X-coordinate {m}
4.000000000000,    !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.160792000000,    !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
7.400000000000,    !- Vertex 2 X-coordinate {m}
4.000000000000,    !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
0.260792000000,    !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
6.200000000000,    !- Vertex 3 X-coordinate {m}
4.000000000000,    !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
0.260792000000,    !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
6.200000000000,    !- Vertex 4 X-coordinate {m}
4.000000000000,    !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.160792000000;    !- Vertex 4 Z-coordinate {m}
    
```

FenestrationSurface:Detailed,

```

ventanaN1,         !- Name
Window,            !- Surface Type
ventana casa,      !- Construction Name
paredN,           !- Building Surface Name
,                  !- Outside Boundary Condition Object
,                  !- View Factor to Ground
,                  !- Shading Control Name
,                  !- Frame and Divider Name
,                  !- Multiplier
    
```

```

4,                !- Number of Vertices
5.3400000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.2607920000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
5.3400000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
1.2607920000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
3.3400000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
1.2607920000000, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
3.3400000000000, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.2607920000000; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

FenestrationSurface:Detailed,
ventanaN2,        !- Name
Window,          !- Surface Type
ventana casa,    !- Construction Name
paredN,          !- Building Surface Name
,                !- Outside Boundary Condition Object
,                !- View Factor to Ground
,                !- Shading Control Name
,                !- Frame and Divider Name
,                !- Multiplier
4,                !- Number of Vertices
2.8600000000000, !- Vertex 1 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
2.2607920000000, !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
2.8600000000000, !- Vertex 2 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
1.2607920000000, !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
0.8600000000000, !- Vertex 3 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
1.2607920000000, !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
0.8600000000000, !- Vertex 4 X-coordinate {m}
4.0000000000000, !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
2.2607920000000; !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLEDICTIONARY =====

Output:VariableDictionary,
IDF;                !- Key Field

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: OUTPUT:VARIABLE =====

Output:Variable,
*,                  !- Key Value
Surface Outside Face Temperature, !- Variable Name
Hourly;            !- Reporting Frequency
    
```

Anexo 5. Registro de temperaturas máximas y mínimas en los meses de junio, julio y agosto de año 2016 en Ilave y en Mazo Cruz

ILAVE			MAZO CRUZ		ILAVE			MAZO CRUZ		ILAVE			MAZO CRUZ	
jun-16			jun-16		jul-16			jul-16		ago-16			ago-16	
DIA	MAX	MIN	MAX	MIN	DIA	MAX	MIN	MAX	MIN	DIA	MAX	MIN	MAX	MIN
1	16.4	-5.2	15.8	-16.6	1	15.4	-1.0	15.0	-9.2	1	15.2	1.0	20.4	-8.8
2	16.2	-4.4	18.4	-17.4	2	13.8	-1.0	13.8	-8.6	2	14.2	2.8	16.6	4.2
3	16.0	-6.4	17.4	-16.8	3	14.8	-2.2	15.6	-6.2	3	15.8	5.2	19.4	-4.4
4	15.4	-11.2	16.8	-16.0	4	14.0	-2.2	14.6	-12.8	4	17.6	3.4	20.2	-2.4
5	17.0	-6.0	18.4	-13.0	5	17.2	-0.4	14.0	-8.4	5	17.6	-1.4	19.6	-14.6
6	15.8	-1.4	15.8	-10.8	6	14.2	-6.0	16.4	-14.6	6	17.4	2.0	18.6	-12.6
7	15.8	-3.0	16.8	-11.2	7	10.6	-2.8	6.4	-1.4	7	17.2	-3.4	19.4	-14.6
8	15.6	-4.4	17.6	-15.2	8	15.2	0.8	15.2	1.0	8	16.8	-1.2	19.8	-11.6
9	15.8	-4.2	17.2	-13.8	9	14.2	-2.2	15.6	-10.4	9	17.0	4.2	17.4	-7.4
10	16.6	-3.0	16.6	-11.0	10	16.6	-3.0	16.2	-12.6	10	13.6	4.6	18.2	-1.6
11	16.0	-2.0	17.4	-12.8	11	15.0	-4.2	17.4	-12.6	11	13.2	3.2	17.4	-4.4
12	16.6	-0.4	15.8	-11.2	12	15.8	-6.2	16.4	-15.4	12	17.6	0.0	18.4	-7.6
13	16.4	1.2	17.4	-8.0	13	16.0	-4.2	17.2	-15.0	13	17.2	1.0	20.2	-8.6
14	16.4	1.4	17.2	-9.6	14	15.6	-3.0	16.6	-11.0	14	18.0	1.6	21.2	-9.0
15	16.6	-0.4	17.4	-10.4	15	16.8	-4.6	16.4	-12.6	15	18.2	0.4	21.6	-10.2
16	15.2	-2.6	18.2	-10.6	16	16.2	-3.8	17.6	-12.4	16	18.4	3.4	20.2	-6.6
17	16.4	-3.6	16.2	-12.6	17	16.0	-0.8	18.2	-10.0	17	18.0	5.4	18.4	1.4
18	15.6	-6.4	15.8	-18.4	18	16.6	-0.6	17.8	-10.0	18	17.0	4.0	20.0	-4.2
19	15.2	-5.6	15.4	-16.2	19	15.8	1.8	17.8	-8.2	19	18.2	0.6	21.2	-8.6
20	15.0	-2.6	15.6	-12.0	20	15.6	3.2	16.8	-8.0	20	16.6	1.0	18.4	-6.6
21	15.4	-7.0	15.8	-18.4	21	15.8	-0.8	17.4	-11.2	21	15.8	3.6	17.2	-1.4
22	15.0	-8.6	16.8	-17.2	22	15.6	-1.2	18.4	-12.4	22	16.8	2.0	20.4	-4.4
23	14.4	-6.6	17.4	-17.6	23	15.8	-2.2	18.4	-12.2	23	17.2	1.6	20.4	-2.0
24	15.2	-5.6	16.8	-16.2	24	16.6	-4.2	18.8	-12.0	24	17.4	6.2	18.8	-4.0
25	15.2	-2.4	15.4	-8.2	25	15.6	-1.6	17.6	-10.6	25	17.4	0.6	21.2	-8.4
26	15.0	-6.2	15.6	-14.8	26	17.0	-5.2	18.6	-17.6	26	17.6	2.8	20.6	-9.2
27	15.0	-3.8	17.2	-12.6	27	17.4	-2.8	19.2	-14.0	27	14.6	4.4	20.2	-7.2
28	13.8	1.6	9.2	-4.8	28	18.2	-3.4	19.8	-14.0	28	16.4	5.4	19.4	0.2
29	13.2	-1.8	12.2	-6.4	29	16.8	-2.0	18.4	-12.4	29	15.6	4.6	16.2	3.6
30	15.0	-3.4	14.6	-10.2	30	16.2	-5.4	16.8	-15.6	30	16.6	2.8	18.8	-2.0
					31	15.4	-6.4	17.8	-15.8	31	17.8	1.6	19.6	-10.4

Fuente: Senamhi Puno

