

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE LA RELEVANCIA DE LOS PARÁMETROS QUE
INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE UN
EDIFICIO RESIDENCIAL DE LA CIUDAD DE QUITO UTILIZANDO
MODELAMIENTO EN MATLAB.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

RAMÍREZ RAMÍREZ CÉSAR LEONARDO

cesar.ramirez@epn.edu.ec

SALINAS VILLACÍS JOSÉ RICARDO

jose.salinas01@epn.edu.ec

Director: DR. FREDDY ORDÓÑEZ

freddy.ordonez@epn.edu.ec

Codirector: ING. CARLOS NARANJO, M.SC.

carlos.naranjo@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2016

DECLARACIÓN

Nosotros, CÉSAR LEONARDO RAMÍREZ RAMÍREZ y JOSÉ RICARDO SALINAS VILLACÍS, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**CÉSAR LEONARDO RAMÍREZ
RAMÍREZ**

**JOSÉ RICARDO SALINAS
VILLACÍS**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por CÉSAR LEONARDO RAMÍREZ RAMÍREZ y JOSÉ RICARDO SALINAS VILLACÍS, bajo nuestra supervisión.

Dr. Freddy Ordóñez
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Carlos Naranjo, M.SC.
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su constante compañía y bendiciones brindadas en cada paso dado en la búsqueda de alcanzar cada meta planteada y sueño anhelado en el camino de la vida.

A mis padres Manuel y Teresa por su ejemplo de vida y apoyo incondicional en la búsqueda de alcanzar mi formación profesional. A mis hermanos Carlos y Verónica por su constante ayuda y por la confianza mostrada para alcanzar mis metas.

A mis tíos Gloria y Marco, Abraham e Isabel, Ángel y Maricela y primos María Isabel, Sebastián, Ismael, Nicolás, Luis Ángel, Alejandra, Salome, por su presencia y sin cuyo apoyo en todo sentido sería más difícil la culminación de esta etapa de mi vida.

Un agradecimiento especial al Dr. Freddy Ordóñez por su tiempo, paciencia y guía brindados que hicieron posible el acertado desarrollo y culminación de este proyecto.

Al Ing. Carlos Naranjo por su colaboración y continuos consejos para la correcta elaboración y finalización de este proyecto.

A Bryan, Javier y José de demás amigos por la amistad brindada, por sus continuos consejos y ayudas recibidas, para hacer de esta etapa una gran experiencia de vida.

César Leonardo

AGRADECIMIENTOS

A Dios que ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar.

A mis padres, Miguel y Genoveva, por su amor, comprensión, por haber depositado su entera confianza en cada reto que se me presentaba y ser el pilar fundamental en mi vida siendo un ejemplo de perseverancia y humildad.

A mi hermana Ángela, por ser mi amiga y por su ayuda en todos los momentos que he necesitado.

A Vinicio por sus consejos y formar parte de mi familia compartiendo las cosas buenas y malas.

A mis sobrinos Isabella y Daniel que con su llegada han llenado de alegría a toda la familia siendo un motivo más para continuar adelante.

A mis abuelitos y tíos por ser una guía a lo largo de mi vida.

A mis primos en especial a Gabriel, Estefanía y Viviana, por los momentos llenos de alegría que hemos compartido.

Al Dr. Freddy Ordoñez y el Ing. Carlos Naranjo, por su guía y apoyo para la culminación del presente proyecto.

A Bryan, Javier, César y demás amigos que han hecho de esta travesía una gran experiencia llena de alegría y buenos momentos.

A Carito por su cariño y apoyo en esta etapa.

Y a todas las personas que de alguna manera forman parte de mi vida.

José Ricardo

DEDICATORIA

Dedico el esfuerzo realizado para la exitosa culminación de este proyecto a mis padres Manuel y Teresa por todo su apoyo y confianza brindados en el transcurso de mi formación académica, por el ejemplo de humildad mostrado e inculcarme todos los valores que hoy me permiten convertirme en un profesional.

César Leonardo

A mis padres Miguel y Genoveva, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar, siendo mí apoyo en todo momento.

José Ricardo

Índice general

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	VI
ÍNDICE.....	VII
NOMENCLATURA.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
PRESENTACIÓN.....	XIX
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XX
1. CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. ALCANCE.....	3
1.4. METODOLOGÍA.....	4
1.5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.5.1. PAREDES, TECHOS Y VENTANAS.....	7
1.5.1.1. Paredes y techos.....	7
1.5.1.2. Ventanas.....	8
1.5.2. INCIDENCIA SOLAR.....	9
1.5.3. CONFORT TÉRMICO EN LOS EDIFICIOS.....	9
1.5.4. NORMATIVA APLICABLE A LOS EDIFICIOS.....	10
1.6. CLIMATOLOGÍA DE QUITO.....	10
1.6.1. AÑO TÍPICO METEOROLÓGICO.....	11
1.7. SOFTWARE PARA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICACIONES.....	12
2. CAPITULO II.....	14
MODELACIÓN DEL EDIFICIO TIPO.....	14
2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	14

2.1.1.	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	15
2.1.2.	TAMAÑO Y FORMA DE LA CONSTRUCCIÓN	16
2.1.3.	PARÁMETROS DE ESTUDIO	18
2.1.3.1.	Orientación de la construcción	18
2.1.3.2.	Ventanas.....	19
2.1.3.3.	Infiltraciones.....	20
2.1.3.4.	Materiales	21
2.1.3.4.1.	Techos.....	21
2.1.3.4.2.	Paredes	22
2.1.3.5.	Parámetros fijos de los componentes.....	23
2.2.	MODELO FÍSICO	24
2.2.1.	ESTUDIO DE LA ZONA TÉRMICA.....	24
2.2.2.	CONDUCCIÓN UNIDIMENSIONAL DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO EN LA ENVOLVENTE DEL MODELO	27
2.2.2.1.	Balance de energía en el nodo interior.....	28
2.2.2.2.	Balance de energía en el nodo exterior dentro de la vivienda	29
2.2.2.2.1.	Radiación solar dentro de la vivienda.....	30
2.2.2.2.2.	Ángulo de incidencia del sol (θ)	31
2.2.2.2.3.	Coefficiente de convección dentro de la vivienda.....	34
2.2.2.2.4.	Coefficiente de convección para ventanas dentro de la vivienda	35
2.2.2.3.	Balance de energía en el nodo exterior fuera de la vivienda	37
2.2.2.3.1.	Radiación solar directa y difusa externa (onda corta).....	37
2.2.2.3.2.	Radiación externa de onda larga	38
2.2.2.3.3.	Coefficiente de convección fuera de la vivienda.....	40
2.2.3.	ECUACIONES RESULTANTES	43
3.	CAPÍTULO III	45
	VALIDACIÓN DEL MODELO	45
3.1.	CONSIDERACIONES EN EL MODELO DE MATLAB Y UTILIZADAS POR ENERGYPLUS.....	45
3.2.	DESARROLLO DEL MODELO DE REFERENCIA EN ENERGYPLUS.	46
3.3.	COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO EN MATLAB.....	49
3.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DESARROLLADO EN MATLAB.....	49
3.3.2.	MODELOS DESARROLLADOS PARA LA VALIDACIÓN	52
3.3.3.	COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN.....	54
3.3.3.1.	Resultados modelo A.....	54

3.3.3.2. Resultados modelo B	56
3.3.3.3. Resultados modelo C	57
3.3.3.4. Resultados modelo D	59
3.3.3.5. Análisis de Validación	60
4. CAPÍTULO IV	61
ESTUDIO PARAMÉTRICO	61
4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESCOGIDOS PARA EL ESTUDIO PARAMÉTRICO	61
4.2. ESTUDIO PARAMÉTRICO	62
4.2.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO	63
4.2.1.1. Materiales paredes	63
4.2.1.2. Materiales del techo	65
4.2.1.3. Orientación de la construcción	67
4.2.1.4. Infiltraciones	70
4.2.1.5. Porcentaje de acristalamiento	72
4.2.2. RELEVANCIA DE LOS PARÁMETROS	76
5. CAPÍTULO V	78
5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.2. BIBLIOGRAFÍA	82
6. APÉNDICES	85
6.1. APÉNDICE A	85
6.1.1. GOOGLE SKETCHUP	86
6.1.2. OPENSTUDIO	88
6.1.3. ENERGYPLUS	89
6.1.4. IDF EDITOR	95
6.2. APÉNDICE B	99
6.2.1. RESULTADOS DEL PRIMER ESTUDIO PARAMÉTRICO	99
6.3. APÉNDICE C	105
6.3.1. CÓDIGO MATLAB	105
6.4. ANEXO 1	125
6.4.1. VISTA DE PLANTA CASA MIDUVI	125

Índice de tablas

Tabla 2.1. Ubicación del sitio de estudio.....	16
Tabla 2.2. Dimensiones generales del modelo	18
Tabla 2.3. Propiedades del vidrio utilizado.....	19
Tabla 2.4. Propiedades de los techos que componen el modelo	22
Tabla 2.5. Propiedades de las paredes que componen el modelo	23
Tabla 2.6. Parámetros fijos de los componentes.....	23
Tabla 2.7. Angulo de declinación solar	32
Tabla 2.8. Angulo azimutal de superficie.....	33
Tabla 2.9. Coeficientes de la dirección del viento	41
Tabla 2.10. Coeficientes del perfil de velocidad	41
Tabla 2.11. Coeficientes del perfil de velocidad	42
Tabla 2.12. Coeficientes de rugosidad.....	42
Tabla 3.1. Características del modelo de Matlab y EnergyPlus.....	45
Tabla 3.2. Nomenclatura utilizada para el diagrama de flujo	49
Tabla 3.3. Características Modelo A	52
Tabla 3.4. Características Modelo B	53
Tabla 3.5. Características Modelo C	53
Tabla 3.6. Características Modelo D	54
Tabla 3.8. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo A.....	55
Tabla 3.9. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo B.....	57
Tabla 3.10. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo C ...	58
Tabla 3.11. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo D ...	60
Tabla 4.1. Parámetros estudiados	61
Tabla 4.2 Parámetros fijos de los componentes.....	63
Tabla 4.3. Horas de confort térmico con diferentes materiales de paredes	64
Tabla 4.4. Horas de confort térmico con diferentes materiales del techo	66
Tabla 4.5. Horas de confort térmico con diferentes orientaciones de la vivienda	68
Tabla 4.6. Horas de confort térmico para diferentes tasas de infiltración	71
Tabla 4.7. Horas de confort térmico al variar las ventanas norte y sur	72
Tabla 4.8. Horas de confort térmico al variar las ventanas este y oeste.....	73

Índice de figuras

Figura 2.1. Forma del modelo de estudio.....	17
Figura 2.2. Esquema del modelo base y del modelo rotado 60° respecto al eje norte	19
Figura 2.3. Infiltraciones de aire en un edificio	21
Figura 2.4. Balance de energía en la zona térmica	26
Figura 2.5. Discretización del elemento pared y flujos de calor para cada tipo de nodo	28
Figura 2.6. Ángulos solares para superficies verticales y horizontales.....	32
Figura 2.7. Comportamiento del viento sobre una edificación en barlovento y sotavento	41
Figura 3.1. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en MATLAB.....	51
Figura 3.2. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo A	55
Figura 3.3. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo B	57
Figura 3.4. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo C	58
Figura 3.5. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo D	59
Figura 4.1 Distribución de temperaturas con diferentes materiales de paredes	64
Figura 4.2. Temperatura de la zona con diferentes materiales de paredes	64
Figura 4.3. Distribución de temperaturas con diferentes materiales del techo.....	66
Figura 4.4. Temperatura de la zona con diferentes materiales del techo	66
Figura 4.5. Distribución de temperaturas con diferentes orientaciones de la vivienda.	68
Figura 4.6. Temperatura de la zona al con diferentes orientaciones de la vivienda.....	68
Figura 4.7. Distribución de temperaturas para diferentes tasas de infiltración.....	70
Figura 4.8. Temperatura de la zona para diferentes tasas de infiltración	71
Figura 4.9. Distribución de temperaturas al variar las ventanas norte y sur	72
Figura 4.10. Distribución de temperaturas al variar las ventanas este y oeste	73
Figura 4.11. Distribución de temperaturas al variar la ventana norte.....	73
Figura 4.12. Distribución de temperaturas al variar la ventana sur.....	74
Figura 4.13. . Distribución de temperaturas al variar la ventana este	74
Figura 4.14. Distribución de temperaturas al variar la ventana oeste	74
Figura 4.15. Temperatura de la zona al variar el porcentaje de ventanas este-oeste..	75
Figura 4.16. Temperatura de la zona al variar el porcentaje de ventanas norte sur	75
Figura 6.1. Pantalla inicial de SketchUp.....	86
Figura 6.2. Pantalla de dibujo SketchUp	87
Figura 6.3. Iconos del Plugin OpenStudio	88
Figura 6.4. Pantalla de EP-Launch	91
Figura 6.5. Resultados de la Simulación.....	92

Figura 6.6. Panel de resultados	93
Figura 6.7. Asignación de salidas al archivo IDF.....	94
Figura 6.8. Muestra de archivo CSV	95
Figura 6.9. Ventana Inicial IDF Editor	96
Figura 6.10. Distribución de Temperaturas al Variar Materiales del Paredes	99
Figura 6.11. Distribución de Temperaturas al Variar Materiales del Techo	99
Figura 6.12. Distribución de Temperaturas al Variar la Orientación de la Construcción	100
Figura 6.13. Distribución de Temperaturas al Variar las Infiltraciones.....	101
Figura 6.14. Distribución de Temperaturas al Variar las Ventanas Norte y Sur	102
Figura 6.15. Distribución de Temperaturas al Variar las Ventanas Este y Oeste.....	102
Figura 6.16. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Norte.....	103
Figura 6.17. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Sur.....	103
Figura 6.18. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Este	104
Figura 6.19. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Oeste	104
Figura 6.20. Vista de planta casa MIDUVI	125

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
a	Coficiente relativo a la dirección del viento	$\frac{W}{m^2 K} \left(\frac{m}{s}\right)^b$
A_{ext}	Área superficial exterior del componente	m^2
A_{int}	Área superficial interior del componente	m^2
A_{ir}	Área irradiada por la superficie de la ventana sobre los componentes	m^2
$A_{s,v}$	Área soleada de la ventana	m^2
A_s	Área soleada del componente	m^2
A_t	Área transversal del componente	m^2
b	Coficiente relativo a la dirección del viento	-
$Bi_{c,int}$	Número de Biot de convección de la superficie interior del componente	-
$Bi_{c,ext}$	Número de Biot de convección de la superficie exterior del componente	-
$Bi_{r,air}$	Número de Biot de radiación con el aire	-
$Bi_{r,gnd}$	Número de Biot de radiación con el suelo	-
$Bi_{r,sky}$	Número de Biot de radiación con el cielo	-
$C_{p,c}$	Calor específico del material de los componentes	$\frac{J}{kg K}$
$C_{p,air}$	Calor específico del aire de la zona	$\frac{J}{kg K}$
C_z	Capacitancia térmica	$\frac{J}{K}$
f_{ir}	Factor de irradiación directa	-
f_s	Factor de sombra	-
F_{air}	Factor visible de temperatura entre la superficie de la pared y el aire	-
F_d	Factor de vista partitivo de radiación cielo - aire	-
F_{gnd}	Factor visible de temperatura entre la superficie del componente y el suelo	-
F_{sky}	Factor visible de temperatura entre la superficie del componente y el cielo	-
Fo	Número de Fourier	-
g	Aceleración de la gravedad	$\frac{m}{s^2}$
Gr_L	Número de Grashof	-
$h_{c,ext}$	Coficiente de convección de la superficie externa del componente	$\frac{W}{m^2 K}$
$h_{c,ls}$	Coficiente de convección externo para superficies lisas	$\frac{W}{m^2 K}$
$h_{c,int}$	Coficiente de convección de la superficie interna del componente	$\frac{W}{m^2 K}$

h_f	Coefficiente de convección forzado en la superficie exterior del componente	$\frac{W}{m^2 K}$
h_n	Coefficiente de convección natural en la superficie exterior	$\frac{W}{m^2 K}$
$h_{r,air}$	Coefficientes de transferencia de calor radiativo linealizado del aire	$\frac{W}{m^2 K}$
$h_{r,gnd}$	Coefficientes de transferencia de calor radiativo linealizado del suelo	$\frac{W}{m^2 K}$
$h_{r,sky}$	Coefficientes de transferencia de calor radiativo linealizado del cielo	$\frac{W}{m^2 K}$
h_{vi}	Coefficiente de convección de la superficie interior de las ventanas	$\frac{W}{m^2 K}$
H	Altura de la ventana	m
I_b	Irradiancia solar directa	$\frac{W}{m^2}$
I_g	Irradiancia solar difusa entre la superficie y el suelo	$\frac{W}{m^2}$
I_s	Irradiancia solar difusa entre la superficie y el cielo	$\frac{W}{m^2}$
I_{tf}	Irradiancia total difusa	$\frac{W}{m^2}$
k	Conductividad térmica del material de los componentes	$\frac{W}{m K}$
k_{air}	Conductividad térmica del aire de la zona térmica	$\frac{W}{m K}$
L_c	Longitud característica	m
\dot{m}	Flujo másico de aire entre las zonas	$\frac{Kg}{s}$
\dot{m}_{inf}	Flujo másico de aire debido a las infiltraciones	$\frac{Kg}{s}$
Nu_v	Número de Nusselt en la superficie interior de ventanas	-
Nu	Número de Nusselt en la superficie interna del componente (paredes, techo, piso y puerta)	-
P	Perímetro de los componentes	m
Pr	Número de Prandtl	-
q''_{df}	Flujo de calor por radiación difusa de onda corta	$\frac{W}{m^2}$
$q''_{sol,int}$	Flujo de calor por radiación solar de onda corta de la superficie interna	$\frac{W}{m^2}$
$q''_{sol,ext}$	Flujo de calor por radiación solar de onda corta de la superficie externa	$\frac{W}{m^2}$
q''_{air}	Flujo de calor por radiación entre la superficie exterior del componente con el aire	$\frac{W}{m^2}$
q''_{gnd}	Flujo de calor por radiación entre la superficie exterior del componente con el suelo	$\frac{W}{m^2}$
q''_{sky}	Flujo de calor por radiación entre la superficie exterior del componente con el cielo	$\frac{W}{m^2}$
q''_{LWR}	Flujo de calor por radiación entre la superficie exterior con el aire y sus alrededores (onda larga)	$\frac{W}{m^2}$
$q_{c,int}$	Transferencia de calor por convección entre la superficie interior con el aire	W
$q_{c,ext}$	Transferencia de calor por convección entre la superficie exterior con el aire	W

q_{dft}	Radiación difusa total que entra a la zona a través de las ventanas	W
q_{kd}	Transferencia de calor por conducción a través del lado derecho de la pared	W
q_{ki}	Transferencia de calor por conducción a través del lado izquierdo de la pared	W
q_{LWR}	Transferencia de calor por radiación entre la superficie exterior con el aire y sus alrededores (onda larga)	W
$q_{sol,int}$	Transferencia de calor por radiación solar de onda corta de la superficie interna	W
Q_{ci}	Transferencia de calor entre cargas internas y la zona (personas, equipos eléctricos)	W
Q_{sis}	Transferencia de calor entre sistemas de climatización de aire y la zona	W
Ra_H	Número de Rayleigh basado en la altura de la ventana	-
Ra_L	Número de Rayleigh basado en la longitud característica de los componentes	-
Ra_φ	Número de Rayleigh basado en el ángulo de inclinación de la ventana	-
R_f	Coefficiente de rugosidad de superficie	-
T_∞	Temperatura del aire ambiente	K
T_{gnd}	Temperatura del suelo	K
T_i^t	Temperatura del nodo i en el tiempo t	
$T_{m,f}$	Temperatura media película del aire de la zona térmica	K
T_{se}	Temperatura de la superficie externa de los componentes	K
T_{si}	Temperatura de la superficie interna de los componentes (paredes, techo, ventanas o piso)	K
T_{sky}	Temperatura del cielo	K
T_z	Temperatura del aire de la zona térmica	K
V_{met}	Velocidad del viento medida en la estación meteorológica	$\frac{m}{s}$
V_z	Velocidad del viento a la altitud z	$\frac{m}{s}$
V_{zon}	Volumen de la zona térmica	m^3
z	Altura del centroide de la construcción con respecto al suelo	m
z_{met}	Altura sobre el suelo del sensor de velocidad del viento en la estación meteorológica	m
α	Difusividad térmica	$\frac{m^2}{s}$
α_s	Absortancia solar de la superficie del componente	-
β	Ángulo de altitud solar	rad
β_{air}	Coefficiente de expansión volumétrica del aire	K^{-1}
γ	Ángulo solar azimutal de superficie	rad

δ	Ángulo de declinación solar	<i>rad</i>
ε	Emisividad de onda larga de la superficie	-
H	Ángulo horario	<i>rad</i>
ζ	Espesor del perfil de la velocidad del viento en la capa límite en el modelo	<i>m</i>
ζ_{met}	Espesor del perfil de la velocidad del viento en la capa límite en la estación meteorológica	<i>m</i>
θ	Angulo de incidencia del sol	<i>rad</i>
θ_H	Angulo de incidencia del sol para superficies horizontales	<i>rad</i>
θ_v	Angulo de incidencia del sol para superficies verticales	<i>rad</i>
l	Ángulo de latitud local	<i>rad</i>
ν	Viscosidad cinemática del aire de la zona térmica	$\frac{m^2}{s}$
ξ	Exponente del perfil de la velocidad del viento en el modelo	-
ξ_{met}	Exponente del perfil de la velocidad del viento en la estación meteorológica	-
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\frac{W}{m^2 K^4}$
ρ_{air}	Densidad del aire de la zona	$\frac{Kg}{m^3}$
ρ_c	Densidad del material de los componentes	$\frac{Kg}{m^3}$
\varnothing	Ángulo solar azimutal	<i>rad</i>
ΔT_{ext}	Diferencia de temperatura entre la superficie exterior del componente y el aire ambiente	<i>K</i>
ΔT_{int}	Diferencia de temperatura entre la superficie interna del componente y la zona interna	<i>K</i>
Δt	Diferencial de Tiempo	<i>s</i>
Δx	Distancia entre nodos	<i>m</i>
τ	Transmitancia solar de la ventana	
φ	Angulo de inclinación de la superficie	<i>rad</i>
ψ	Ángulo azimutal de superficie	<i>rad</i>
i	Índice de nodo	
t	Índice de tiempo	
n	Número total de nodos	
N_{ci}	Número total de cargas internas	
N_{Zon}	Número total de zonas térmicas	
N_{Sup}	Número total de superficies en la zona térmica	

RESUMEN

El Ecuador no ha tenido una práctica habitual de incorporar criterios de eficiencia energética o el uso de programas de simulación de comportamiento térmico en la etapa de diseño previa a la construcción, por lo cual es necesario desarrollar herramientas que contribuyan a mejorar desde el diseño el comportamiento térmico de las edificaciones.

En este sentido, el estudio del comportamiento térmico del ambiente interior de edificaciones permite estimar su consumo de energía y establecer lineamientos para reducir el consumo energético de las edificaciones, por lo cual el presente proyecto plantea como objetivo establecer la relevancia de los parámetros más influyentes en el comportamiento térmico de una edificación a través de simulación energética y modelación en Matlab.

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica que incluye diversas metodologías para modelar edificios y estudios particularizados de los parámetros de mayor influencia en el comportamiento térmico de las edificaciones, la cual se utiliza como sustento para el desarrollo de modelos simplificados para determinar el comportamiento térmico de edificaciones utilizando el lenguaje de programación Matlab, dichos modelos se validarán numéricamente mediante comparación con modelos desarrollados en EnergyPlus. Además, la búsqueda bibliográfica permitió establecer los parámetros más importantes a ser estudiados en función del modelo desarrollado, los cuales son: orientación de la construcción, materiales de la envolvente (techo, paredes, piso), porcentaje de acristalamiento e infiltraciones.

Los modelos desarrollados se utilizan para, a través de un estudio paramétrico, determinar la influencia de los parámetros que afectan el comportamiento térmico de la edificación. Cada parámetro será sometido a una variación dentro de un rango establecido y será evaluada su influencia en el comportamiento de la temperatura de la zona interna del edificio.

Palabras clave: Edificación, Análisis Paramétrico, Eficiencia energética, EnergyPlus, Matlab.

ABSTRACT

Ecuador has not had a habitual practice of incorporating effective energetic criteria or the using of simulation programs about thermal behavior at the stage of pre-construction design. Therefore it is necessary to develop tools for improve since design the thermal behavior of buildings.

For this purpose, the study of the thermal characteristics of the buildings' indoor environment allows the estimation and provide guidelines to reduce their energy consumption. Thus, this project aims to order, in terms of relevance, the most influential parameters on a building's thermal behavior through energy simulation and modeling in Matlab.

This thesis presents a literature review, which includes a variety of methodologies to model buildings and specialized studies of energetic models for the main parameters that influence on the buildings' energy performance. The literature review is used to support the development of simplified models of a building's thermal behavior in the Matlab programming language, which will be numerically validated by comparison with models developed in EnergyPlus. Furthermore, the literature review allowed establishing the main parameters studied based on the developed model, these are: orientation, envelope materials, percent of glazing and infiltration rate.

The developed models are used to evaluate, through a parametric study, the influence of the variables that affect the energy performance of homes in the city of Quito. Each parameter is subjected to a variation within a set range and its influence on the temperature behavior of the building's inner environment is evaluated.

Keywords: Edification, Thermal zone, Parametric analysis, Energy efficiency, EnergyPlus, Matlab.

PRESENTACIÓN

En varias aplicaciones de la Ingeniería Mecánica se ven involucrados procesos de transferencia de calor, como es el análisis del comportamiento térmico de edificaciones, para el cual la utilización de programas de simulación se ha convertido en una herramienta imprescindible. Estas herramientas permiten la creación de estrategias y realización de estudios que permiten el desarrollo de edificaciones energéticamente eficientes.

Este proyecto ha logrado determinar el impacto de la variación de las diferentes características de la envolvente de la edificación (techo, paredes, ventanas, piso), además la orientación e infiltraciones sobre el comportamiento térmico en el ambiente de la zona interna de la edificación, como parte de un programa de investigación más amplio que pretende encontrar correlaciones simplificadas para el diseño energético eficiente de las viviendas en el Ecuador.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Edificio: Según el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua edificio se define como: Construcción estable, hecha con materiales resistentes, para ser habitada o para otros usos. Y según la norma NTE INEN 2 506:2009 (EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES. REQUISITOS) se define como: Toda construcción, sea transitoria o permanente destinada a satisfacer las necesidades del hombre, a sus pertenencias y actividades.

Envolvente del edificio: Se refiere al techo, vanos, paredes, puertas, ventanas, y piso que conforman un edificio (NTE INEN 2 506,2009).

Zona Térmica: Una zona térmica puede consistir en una sola habitación o varias habitaciones que tienen características térmicas similares, donde su característica fundamental es que el aire dentro de la zona se modela con la suposición de que existe una temperatura de aire uniforme. (Departamento de Energía de Estados Unidos)

Confort Térmico: El confort térmico es definido por la ASHRAE 55 y UNE-EN ISO 7730 como el "estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico".

Parámetro: Según el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua parámetro se define como: Variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico.

Variable: Según el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua variable se define como: Magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto.

Eficiencia Energética: Consiste en el ahorro y uso inteligente de la energía sin pérdidas ni desperdicios, utilizando la mínima energía y manteniendo la calidad de bienes y servicios, para conservar el confort. (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables)

Inercia térmica: La capacidad de un material para acumular y almacenar energía calorífica para ser liberada durante un período de tiempo. (Efficient Building™ System, 2013)

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. JUSTIFICACIÓN

Para mantener el nivel de vida y de confort de la sociedad actual, es necesario un alto consumo energético. Un reto actual consiste en mantener el nivel de actividad, de transformación y de progreso, pero ajustado a los recursos existentes y evitando el derroche energético (Francisco, Rey, & Gomez, 2006), lo que se define como eficiencia energética. El consumo de energía de los edificios, tanto residencial como comercial, ha alcanzado cifras de entre el 20% y 40% en países desarrollados, cifra que supera incluso a sectores como el industrial y el transporte (Pérez, Ortiz, & Pout, 2008). Cifras similares son mencionadas también en el informe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) (Pouffary & Rogers, 2014).

En lo que respecta al país, Ecuador no ha tenido una práctica habitual de incorporar criterios de eficiencia energética o el uso de programas de simulación de comportamiento energético en la etapa de diseño previa a la construcción. El proceso de planificación arquitectónica convencional no prioriza la interacción de los habitantes con la vivienda, como tampoco el comportamiento térmico al interior asociado al clima y a otros factores externos. Todo esto representa para el país, pérdidas económicas por el uso ineficiente de los recursos energéticos en las edificaciones, sean viviendas, oficinas o industrias (INER, 2015). El Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (MICSE) informa que el consumo de energía en el sector residencial representa el 12% de la energía total y que el consumo de electricidad en el sector residencial y comercial representa aproximadamente el 60% de la energía eléctrica total producida, perteneciendo el 32% al sector residencial (Carvajal & Orbe, 2015), este consumo de electricidad no especifica su objetivo de consumo pudiendo ser iluminación, climatización para alcanzar el confort térmico o equipos eléctricos y electrónicos. Este consumo no tiene el mismo impacto sobre la matriz energética que en países desarrollados, debido principalmente a que en los estratos económicos bajos no se suele utilizar

sistemas activos para alcanzar el confort térmico. Furano (2011) define esta particularidad como déficit cualitativo de la vivienda que incluye el acceso limitado a recursos energéticos, servicios básicos y viviendas seguras. Según datos del Ministerio Coordinador de Desarrollo Social (2010), el denominado déficit cualitativo de vivienda en el Ecuador asciende al 33,1%.

Datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) sobre edificaciones, muestran que a nivel nacional la elección de los materiales para viviendas no se realiza en función de las necesidades de habitabilidad y nivel de confort que debe brindar una edificación y solamente se basa en el concepto de vivienda como espacio habitable cerrado y cubierto. Con este fin y de minimizar el consumo energético de las viviendas y/o mejorar la calidad de vida de los ocupantes de las viviendas en el Ecuador, es necesario desarrollar herramientas que contribuyan a mejorar desde el diseño el comportamiento térmico de las edificaciones.

En este sentido, este proyecto propone desarrollar modelos simplificados del comportamiento térmico de edificaciones en Quito que serán programados en Matlab, refiriéndonos a Quito únicamente porque la climatología utilizada corresponde a dicha ciudad. Esta herramienta será utilizada para, a través de un estudio paramétrico, determinar la influencia de los parámetros que afectan al comportamiento térmico de la edificación, de esta manera dar recomendaciones para el diseño de viviendas eficientes energéticamente. Los principales parámetros a ser estudiadas serán, orientación, materiales de la envolvente (techo, paredes, piso), porcentaje de acristalamiento e infiltraciones. Posteriores investigaciones podrían incluir parámetros adicionales climatología de otras ciudades ecuatorianas. Este proyecto es parte de un programa de investigación más amplio que pretende encontrar correlaciones simplificadas para el diseño energético eficiente de las viviendas en el Ecuador. Los usuarios de estas herramientas finales serán los profesionales involucrados en el sector de la construcción, quienes podrán evaluar de una manera rápida y eficiente el comportamiento energético de la vivienda en una etapa de diseño preliminar.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer la relevancia de los parámetros más influyentes en el comportamiento térmico de una edificación residencial de la ciudad de Quito, a través de simulación energética y modelación en Matlab

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo térmico simplificado de un edificio residencial representativo en la ciudad de Quito usando el lenguaje de programación Matlab.
- Validar numéricamente el modelo desarrollado mediante comparación con un modelo de simulación energética de edificaciones desarrollado en EnergyPlus.
- Realizar estudios paramétricos mediante simulación energética con el fin de establecer un orden de prioridad de los parámetros que influyen en el comportamiento térmico de una edificación residencial en la ciudad de Quito.

1.3. ALCANCE

- El presente proyecto pretende mediante simulación energética determinar la influencia de los parámetros (materiales de techo y paredes, infiltraciones de aire, orientación de la edificación y porcentaje de acristalamientos) sobre el comportamiento térmico del ambiente de la zona interna de la edificación.
- Además el proyecto pretende desarrollar modelos simplificados del comportamiento térmico de edificaciones que serán programados en el lenguaje de programación Matlab. Este proyecto es parte de un programa de investigación más amplio que posteriormente pretende encontrar correlaciones simplificadas para el diseño energético eficiente de las viviendas en el Ecuador. Los usuarios de estas herramientas finales serán los profesionales involucrados en el sector de la construcción, quienes podrán evaluar de una manera rápida y eficiente

el comportamiento energético de la vivienda en una etapa de diseño preliminar.

- El proyecto en esta primera fase no pretende analizar el consumo energético de la edificación, sus flujos de energía ganados y perdidos, en lo que se refiere al comportamiento energético, más bien se limita al análisis del comportamiento térmico de la zona interna de la edificación al variar los parámetros escogidos para en estudio.
- El proyecto no pretende desarrollar un programa de cálculo de cargas térmicas de climatización para edificios.
- En lo que respecta a la ciudad de Quito se toma el nombre de ésta en el proyecto únicamente porque para el análisis se utiliza la climatología de dicha ciudad.

1.4. METODOLOGÍA

- Se realizará una revisión bibliográfica de modelos desarrollados para edificaciones. Esta revisión se la realizará tanto en revistas, libros y conferencias científicas.
- Se realizará un estudio sobre la pertinencia de los parámetros que influyen en el comportamiento térmico de una edificación.
- Se desarrollará un modelo simplificado de un edificio residencial representativo en lenguaje de programación Matlab, para la evaluación del rendimiento térmico del mismo. Este modelo tomará en cuenta los datos meteorológicos de la ciudad de Quito.
- Se validará numéricamente el programa desarrollado a través de la comparación sistemática con un modelo de simulación energética de edificaciones en el programa EnergyPlus.
- Se realizarán estudios paramétricos para establecer una relevancia cualitativa de los diferentes parámetros que influyen en el comportamiento térmico de la edificación.

1.5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

MODELOS ENERGÉTICOS PARA EDIFICIOS

Se han utilizado diversas metodologías para modelar edificios, de las cuales se distinguen dos métodos ampliamente utilizados: el método físico y el método basado en datos (Lu, Croome, & Viljanen, 2009). Los modelos que utilizan métodos físicos se basan en leyes de la física que describen los sistemas de construcción, por ejemplo, ecuaciones de calor y humedad (X. Lu, 2002). La principal limitante de estos modelos suelen ser la falta de precisión, debido a que es necesario un gran número de parámetros para representar el sistema completo. Por otra parte, los modelos basados en datos pueden hacer frente a diversas complejidades de los sistemas de construcción, sin embargo se necesita una cantidad considerable de datos para la identificación de los parámetros (T. Lu, Lü, & Kibert, 2015). Estrictamente hablando, no se usan estos métodos por separado y muchos modelos son planteados como una combinación de estos dos.

Como ejemplos de modelos físicos se puede mencionar el modelo de Zupanä y Skrjanc (2001) que utiliza balances de energía junto con un algoritmo de lógica difusa para estudiar la respuesta dinámica térmica en modelos de edificios. Por su parte, Lu et al., (2015) presentan un modelo del consumo de energía en edificios utilizando una sola zona conceptualmente simple pero representativa de todo el edificio. Así mismo Tao et al., (2014) presentan un método para modelar el comportamiento térmico de un edificio físicamente, con la introducción de un bucle dinámico abierto y cerrado, el cual aproxima explícitamente el comportamiento y las relaciones entre el ambiente interior del edificio y su consumo energético. Además X. Lu (2002) presenta un modelo físico para predecir la transferencia de humedad y calor en la envolvente de un edificio así como de su ambiente interno, dicho modelo está basado fundamentalmente en relaciones termodinámicas, donde las leyes de Darcy, Fick y Fourier son usadas para describir las ecuaciones de transferencia de

calor y humedad. El sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales resultantes son discretizadas en el espacio por el método de elementos finitos. En lo que respecta a modelos basados en datos se puede mencionar el presentado por Bălan et al., (2011) en el cual con la recolección experimental de datos en Rumania se logra identificar los parámetros (capacidad térmica del aire en la zona, capacitancia térmica de la estructura, conductividad de paredes y ventanas) del modelo térmico de una casa. En la simulación del modelo, el control del sistema térmico es llevado a cabo usando un modelo basado en un algoritmo de control predictivo el cual puede ser usado para simular diferentes variables que ayudan a reducir el consumo de energía. De manera similar Seem, (2007) utiliza un modelo basado en una lectura diaria del consumo de energía realizado en Milwaukee USA, para detectar irregularidades en el consumo de esta. Este método de análisis de datos podrá reducir los costos operativos, por la detección de problemas que antes pudieron haber pasado desapercibidos.

Otros estudios combinan modelos físicos y basados en datos como el planteado por Larsen y Lesino (2001) quienes muestran un modelo desarrollado en Buenos Aires Argentina que permite simular el comportamiento térmico de edificios frente a determinadas variaciones climáticas para detectar problemas de falta de confort (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), con la posibilidad de introducir ganancias internas. Así también Ferrara, et al., (2014) presentan un estudio paramétrico para la minimización del consumo energético anual de una edificación en Amberieu-en-Bugey, Rhône-Alpes, Francia, este estudio paramétrico se hizo con el propósito de estimar el impacto de la variación de las diferentes características de la envolvente del edificio, la geometría, calefacción, refrigeración y necesidades anuales totales de energía.

Respecto a estudios realizados en el Ecuador se puede mencionar el trabajo del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) realizado por Miño, Lobato, & Labus (2013) quienes en su estudio presentan resultados de simulaciones energéticas de un prototipo diseñado en base a características de viviendas sociales de Ecuador. Se analizaron tres casos de estudio cuya variable es la materialidad de los elementos constructivos, En el Caso 1, los materiales seleccionados corresponden a aquellos que se usan de

forma predominante en las viviendas del país de acuerdo a los datos del último censo expuestos por el INEC. Para el Caso 2, se emplean materiales que se encuentran en proceso de investigación y desarrollo, como es el caso de paneles de caña guadua con aislación de madera de balsa a cargo de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (EcoMateriales, 2009). El Caso 3 utiliza materiales que permiten la movilidad de la vivienda, proceso de armado y desarmado. La zona de análisis corresponde al Cantón Urcuquí en la provincia de Ibarra. Orientación de superficies acristaladas, protecciones solares y aislación térmica se analizaron para el caso que presentó los mejores resultados de confort. A través de estas variables se obtuvieron resultados sobre las condiciones de confort de las viviendas en cada uno de los tres casos. El caso que utiliza los materiales de construcción predominantes de las viviendas sociales en Ecuador, presenta mayor pérdida de energía a través de la envolvente ocasionando un alto nivel de malestar. Sin embargo, se alcanza un 79% de horas de confort a través del uso correcto de aislación térmica y protecciones solares. Por lo que se concluye que para mejorar las condiciones de habitabilidad en una vivienda social, es necesario el uso adecuado de materiales aislantes en la envolvente y un control efectivo de las ganancias solares.

A continuación se muestra una revisión bibliográfica con estudios particularizados, que muestra modelos energéticos de los parámetros que más influyen en el comportamiento energético de las edificaciones, estos son:

1.5.1. PAREDES, TECHOS Y VENTANAS.

A pesar del esfuerzo que se realiza por tener un ambiente confortable dentro de los edificios con la utilización de equipos de calefacción o ventilación, este esfuerzo será vano si el edificio no cuenta con ventanas, paredes o techos adecuados para mantener este ambiente confortable, es por esta razón que resulta de primordial importancia el estudio de estos componentes en los edificios, para conocer los más óptimos en función del ambiente al que está expuesto.

1.5.1.1. Paredes y techos

La conducción de calor a través de la envolvente de edificios es uno de los principales parámetros influyentes en la carga térmica de edificios. En la literatura se presentan varios modelos para estudiar la transferencia de calor a través de paredes, entre ellos se puede mencionar el de Diferencias Finitas (Burch et al., 1992), modelo de Seem's (Seem et al, 1989), modelo de espacios de estado (SSM) (Jiang, 1982), modelo de dominio de tiempo (TDM) (Davies, 1997), o el modelo de la Función de Transferencia (Ceylan & Myers 1980). Por su parte (Chen, et al 2005) han desarrollado un nuevo método para verificar los cálculos de la transferencia de calor transitoria a través de paredes de varias capas en edificios, este método está basado sobre la equivalencia de modelos dinámicos para un sistema lineal y la frecuencia característica de modelos transferencia de calor transitoria en edificios.

Liu et al. (2015) muestran, un modelo acoplado de transferencia de calor y humedad, desarrollado para investigar el comportamiento térmico de paredes exteriores, los resultados mostraron que ignorar la transferencia de humedad causa significativas discrepancias en la predicción de cargas de conducción.

Así mismo Prada et al. (2014) centran su trabajo en el efecto de las propiedades termofísicas de incertidumbre sobre las soluciones numéricas de la ecuación del calor, donde realizan un análisis de sensibilidad aplicado a varios tipos de paredes de edificio en diferentes climas. Este estudio se realizó mediante la técnica de simulación Monte Carlo. La investigación analiza la medida en que las propiedades termofísicas del material de paredes afectan a la fiabilidad tanto del método de diferencias finitas (FD) y el enfoque de las funciones de transferencia de conducción (CTF).

Por otra parte Oliveti, et al. (2015) proponen una metodología para esquematizar los efectos capacitivos en la transferencia de calor en paredes de varias capas en edificios, utilizando la analogía eléctrica y la resolución del circuito equivalente.

1.5.1.2. Ventanas

Al-Hamdani et al. (1987) investigaron el efecto del tamaño, orientación, calidad del vidrio y el sombreado de ventanas sobre el ambiente interno de los edificios, utilizando un modelo transitorio, datos climáticos de Bagdad para el

verano y el invierno fueron utilizados como entrada al modelo. Los resultados mostraron que el ambiente interior no mejora significativamente si el acristalamiento se cambia de simple a doble, además que la orientación sur tiene mayor potencial de mejorar el confort térmico tanto en invierno como verano. De manera similar Singh & Garg (2011) estudian la selección de acristalamientos adecuados para muros de edificios en diferentes climas. Su trabajo muestra cómo una pared de cristal afecta las cargas de calefacción y la refrigeración de un edificio. El estudio incluye varios tipos de acristalamientos como: vidrio de doble acristalamiento claro, doble acristalamiento de baja emisividad y doble acristalamiento con control solar. El análisis es de tres climas: compuesto, caliente y seco, cálidos y húmedos. El estudio incluye efecto de la superficie acristalada, la orientación y los climas, sobre el consumo de energía anual.

Por su parte Lee, et al. (2013) presentan una optimización del consumo anual de calefacción, refrigeración y energía para iluminación asociado con la aplicación de diferentes tipos y propiedades de sistemas de ventanas en la envolvente del edificio. Mediante el uso de modelos de simulación de edificios, varias propiedades de la ventana como el valor U, el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), y la transmitancia visible (Tvis) se evaluaron con diferentes relaciones de pared ventana (WWR) y orientaciones en cinco climas diferentes

1.5.2. INCIDENCIA SOLAR

El balance de energía del edificio está estrictamente relacionado con la irradiación solar, por lo tanto, una estimación fiable de la incidencia de la irradiación global en varias superficies es esencial a fin de dar cuenta de las ganancias térmicas solares en los edificios. Prada et, al.(2014) analizan la influencia de la elección de los modelos de radiación solar sobre a la eficiencia energética calculada para un conjunto de edificios. Así mismo Dorota et al. (2014) simularon un edificio expuesto a radiación solar, considerando un balance energético con diferentes niveles de complejidad.

1.5.3. CONFORT TÉRMICO EN LOS EDIFICIOS

En el estudio del comportamiento térmico de edificaciones es importante hablar sobre el confort térmico que estos ofrecen a sus ocupantes, debido a que este confort térmico está en función de los flujos de energía que entran, salen y se generan en el edificio. El confort térmico es definido por la ASHRAE 55 y UNE-EN ISO 7730 como el "estado de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico". Así mismo el artículo 7 y el Anexo III del Real Decreto 486/1997 establecen rangos de temperaturas confortables: entre 17° C y 27° C, para sedentarismo o entre 14 ° C y 25 ° C, si hay movimientos ligeros de las personas. Estudios como el de Hua, & Göçer (2015) muestran que, los rangos más usados de confort térmico aceptable se basa en el modelo voto promedio predicho, que se calcula con parámetros ambientales interiores, como la temperatura del aire y la temperatura radiante media, el movimiento del aire y la humedad, y parámetros personales, tales como la tasa metabólica, aislamiento de la ropa, etc.

1.5.4. NORMATIVA APLICABLE A LOS EDIFICIOS

La aplicación de códigos y normativas para la construcción y posterior uso de los edificios, ha traído buenos resultados para la reducción del consumo de energía de los edificios, así como para la disminución de emisiones de efecto invernadero de los mismos.

Rodríguez et al., (2014) presentan una revisión de las normas internacionales que regulan los requisitos de aislamiento térmico de los edificios residenciales y la armonización de la pérdida de energía. En este trabajo comparan los requisitos impuestos a la transmitancia térmica de la envolvente, el factor de compactación, y la temperatura interior, en edificios residenciales de varios países de la Unión Europea y los Estados Unidos de América.

Respecto a la normativa ecuatoriana se dispone de la norma NTE INEN 2 506:2009 2009-06 de Eficiencia Energética en Edificaciones. Requisitos, esta norma establece los requisitos que debe cumplir un edificio para reducir a límites sostenibles su consumo de energía y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energías renovables (INEN, 2009).

1.6. CLIMATOLOGÍA DE QUITO

La ciudad de Quito se encuentra ubicada en la línea ecuatorial y atravesada por la cordillera de los Andes (García, 1994). Además el asentamiento de Quito es irregular con una altitud promedio de 2850 m.s.n.m. (Zaldumbide & Molestina, 2006). Estos factores originan una gran variedad de microclimas y cambios considerables a cortas distancias del Distrito Metropolitano de Quito. Las parroquias periféricas tienden a tener un clima cálido, como por ejemplo los valles de Los Chillos, Cumbayá y Tumbaco, pero también seco como Carapungo, Calderón, Pomasqui y la Ciudad Mitad del Mundo.

La variabilidad climática a lo largo del año se caracteriza por periodos lluviosos de gran intensidad y periodos secos con menor frecuencia de lluvias. La época lluviosa se inicia en el mes de octubre y finaliza el mes de mayo, siendo los meses más lluvioso marzo-abril, cuyos valores promedios oscilan entre 169.2 mm y 126.2 mm. La época seca se extiende desde el mes de junio hasta septiembre. El mes más seco es el mes de julio en donde se registran valores en promedio que oscilan entre 20.2 mm y 27.0 mm. Las precipitaciones tienen una distribución espacial muy variable, cuyos valores anuales medios oscilan entre 538.3 mm en Calderón y 3176.5 mm en Chiriboga (INHAMI, n.d.). La temperatura media varía entre los 13° C y 14°C, que por lo general se incrementa de Sur a Norte, excepto en el Antiguo Aeropuerto de Quito, en donde se aprecia un pequeño descenso, debido a que se encuentra ubicado en un lugar libre de obstáculos y con fuertes vientos("CLIMATOLOGÍA. METRO DE QUITO," n.d.).

1.6.1. AÑO TÍPICO METEOROLÓGICO

Los programas de simulación para el estudio de la eficiencia energética en edificaciones requieren de una base de datos climatológica representativa. Esta se conoce como el año típico meteorológico (TMY por sus siglas en inglés). La necesidad de un año típico meteorológico preciso para las simulaciones es entonces de reconocida importancia. Sin embargo, la construcción de este año típico meteorológico plantea algunos inconvenientes. Por ejemplo, se ha sugerido que el uso de una u otra metodología en la construcción de esta base de datos puede resultar en resultados significativamente diferentes(Skeiker, 2007).

También se ha demostrado que debido a que las estaciones meteorológicas están generalmente en zonas rurales, un año típico construido con estos datos puede generar variaciones de hasta el 10% respecto a datos modificados para la ciudad (Chan, 2011). Para el caso de Quito este tipo de estaciones se las encuentra en las zonas urbanas como la estación meteorológica de Ñaquito e Izobamba.

EnergyPlus cuenta con una base de datos “Wheater Data” realizados por el Departamento de Energía de Estados Unidos, en la que se encuentran los datos meteorológicos de 2100 ubicaciones. Para el caso del año tipo que se utilizará en el presente estudio, este fue desarrollado con los datos provenientes de la Estación Meteorológica QUITO INAMHI-INNAQUITO localizada en Pichincha-Ecuador. El año tipo meteorológico consta de los valores horarios de los parámetros ambientales que se muestran a continuación.

- Radiación Global (Wh/m²)
- Radiación Directa (Wh/m²)
- Radiación Difusa (Wh/m²)
- Velocidad de viento (m/s)
- Temperatura de Bulbo Húmedo (°C)
- Temperatura de Bulbo Seco (°C)
- Humedad Relativa (%)
- Presión Atmosférica (mbar)
- Dirección del Viento (deg)
- Precipitación

1.7. SOFTWARE PARA MODELACIÓN Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICACIONES

En la simulación energética de edificios se trata de estimar el comportamiento térmico de las diferentes zonas que conforman el edificio y las prestaciones que están dando las máquinas integradas a la edificación en las condiciones de

trabajo puntuales en cada instante de tiempo, con el fin de integrarlas durante el periodo de tiempo simulado (ATECYR, 2008).

En principio los objetivos perseguidos pueden ser varios, el más evidente es estimar los consumos de energía y la producción asociada de CO₂ que conlleva, pero pueden abarcar otros muy diferentes, como analizar diferentes estrategias de control, analizar diferentes comportamientos de sistemas de climatización, observar la evolución de temperaturas o humedades relativas en las diferentes zonas que conforman el edificio, entre otras (ATECYR, 2008). En el presente caso el objetivo principal es analizar el comportamiento térmico del ambiente interior de un modelo simplificado de edificio residencial, cuando se varían parámetros como orientación, porcentaje de ventanas, material de paredes y techos, infiltraciones, etc.

El uso de programas de simulación energética de edificaciones se ha convertido en una herramienta imprescindible para prever el comportamiento térmico en edificios. Existe una gran variedad de programas de simulación disponibles en el mercado. Algunos de ellos analizan el comportamiento térmico del edificio en estado estacionario, que tienen la ventaja de su facilidad de uso y que contrastan con programas más precisos que trabajan en estado transitorio. Los programas más sofisticados, necesitan una entrada de datos extremadamente detallada, con lo cual su uso en edificaciones complejas requiere mayor cantidad de tiempo y recursos (Larsen et al., 2001).

Ciertos programas de simulación energética requieren de herramientas adicionales para facilitar la modelación e ingreso de datos para la simulación de las edificaciones. En el presente trabajo, se utilizó el programa de simulación EnergyPlus el cual, se apoya en interfaces como SKETCHUP Y OPENSTUDIO.

En el **APENDICE 1** se muestra una descripción detalle de los programas SKETCHUP, OpenStudio y EnergyPlus.

Este estudio bibliográfico de modelos térmicos de edificios, y de modelos térmicos particularizados de los principales componentes del mismo, además de mostrar la diversidad de modelos existentes tanto físicos, basados en datos y combinados que se utilizan para estudiar el comportamiento térmico de los

edificios, también servirán como base para el desarrollo del modelo térmico de edificio residencial que se desarrollará en Matlab. El modelo a desarrollarse en función de los objetivos que persigue este trabajo será un modelo físico, pues en la revisión bibliográfica se encontró que la gran ventaja de utilizar estos modelos es su facilidad para simular diferentes variaciones de modelos con diferentes parámetros, por lo que es posible simular el comportamiento en el caso de diferentes materiales, ubicación geográfica, datos meteorológicos, orientaciones, la posición, el número y porcentaje de ventanas y en diferentes períodos del año.

CAPÍTULO II

MODELACIÓN DEL EDIFICIO TIPO

Dentro del alcance del presente proyecto se desarrollarán modelos simplificados del comportamiento térmico de un edificio, de tal manera que puedan ser utilizados en posteriores estudios paramétricos y optimizaciones. Con ello, se intenta reducir la complejidad del problema, sin perder precisión en los resultados de las simulaciones. En esta sección se definen los parámetros a ser variados en el modelo así como su rango de variación que se utilizará en los posteriores estudios paramétricos. Además, en este capítulo se explica el modelo físico desarrollado en el caso de estudio.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Debido a la necesidad de simplificar la complejidad del modelo y en consecuencia reducir los tiempos computacionales, se plantea el edificio de estudio como una sola zona térmica. Una zona térmica puede consistir en una sola habitación o varias habitaciones que tienen características térmicas similares, donde su característica fundamental es que el aire dentro de la zona se modela con la suposición de que existe una temperatura de aire uniforme cuya evolución temporal será determinada por el modelo y ganancias o pérdidas similares en toda la superficie de la zona. Los datos de entrada serán las condiciones meteorológicas externas (velocidad del viento, temperatura

ambiente, radiación solar, humedad relativa, etc.) y los parámetros de diseño del edificio (geometría, materiales de envolvente, orientación, etc.).

En el diseño de las dimensiones generales de la geometría de la edificación representativa se escoge un paralelepípedo de 6 x 6 x 2,5 m con un área interior de 36 m², debido a las siguientes consideraciones:

- Las dimensiones generales se han basado en planos usados por el MIDUVI en construcción de edificaciones para el sector rural, Ver Anexo1.
- Se selecciona esta geometría con el propósito de que el tamaño del edificio modelado no genere conflicto con la suposición de una sola zona térmica, es decir un volumen con características térmicas similares.

El Proyecto de Investigación 664 (Fisher et al. 1997) de la ASHRAE estableció que este supuesto de zona térmica es válido en un amplio rango de condiciones. La siguiente hipótesis principal es que las superficies de la habitación (paredes, ventanas, suelos, etc.) pueden ser tratadas como si tuvieran:

- Temperaturas de la superficie uniforme
- Radiación Uniforme de onda larga (LW) y de onda corta sobre las superficies.
- Conducción de calor unidimensional dentro de las superficies.

Con este mismo propósito, se despreciaron variables de generación de energía que no están relacionadas directamente con el edificio como son: ganancias internas por ocupantes y equipos, y sistemas de climatización (calefacción, ventilación, refrigeración). Estas variables podrían ser incluidas en futuras investigaciones. El modelo se simulará con las condiciones ambientales de Quito.

2.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La ubicación del edificio es un parámetro fundamental en el comportamiento térmico del edificio. De esta dependen las diferentes estrategias de diseño como protecciones solares, uso de aislamiento, orientación, etc. Un diseño acorde al clima puede ser significativamente más económico, principalmente en

la etapa de operación, que un diseño que no considere la climatología (Swift & Lawrence, 2007). La ubicación geográfica está definida por la latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar del emplazamiento del edificio. Como consecuencia de esta posición se definen las condiciones ambientales externas: ángulos solares anuales, ubicación con respecto a las corrientes de viento, lagos, ríos o montañas que afectan el clima local.

Para el modelo del presente estudio se asume que la edificación se encuentra ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito. La estación meteorológica más cercana es la estación de QUITO INAMHI-INNAQUITO, y se toman los datos obtenidos en esta estación como entrada del modelo. Las coordenadas geográficas de la estación se muestran en la Tabla 2.1. Los datos medidos por dicha estación son públicos y son proporcionados en archivos de datos en formato *.epw (energyplus weather data) que están en la base de datos del programa EnergyPlus. Estos mismos datos serán usados en los códigos desarrollados en Matlab, lo que garantiza una correcta validación del modelo.

Tabla 2.1. Ubicación del sitio de estudio. (INAMHI)

Estación Meteorológica QUITO INAMHI-INNAQUITO	
Localización:	Quito Ecuador
Latitud_G	0G 10' 0" S
Longitud_G	78G 29' 0" W
Zona relativa horaria GMT {GMT+/-}	-5.00
Altitud [m]	2812.00

Algunas de las condiciones ambientales características del sitio de estudio son: Temperatura media anual de 13.9°C, durante el año varía desde una temperatura mínima de 8,2°C a una máxima de 25,1°C. El mes más caluroso del año, con un promedio de 14.1°C, es mayo, mientras que el mes más frío del año, con un promedio de 13.6°C, es el de junio. La precipitación es de 1273 mm al año, donde el mes más seco es julio con 22 mm, mientras que la caída media en abril es de 189 mm que tiene las mayores precipitaciones del año. La humedad relativa media anual es de 76,6% y varía según la estacionalidad desde un mínimo de 33% y un máximo de 100%. (EX-AGENCIA ESPACIAL CIVIL ECUATORIANA)

2.1.2. TAMAÑO Y FORMA DE LA CONSTRUCCIÓN

El tamaño y la forma del edificio son los principales parámetros que determinan el orden de magnitud del consumo de energía. La envolvente térmica (superficies que intercambian calor con el medio ambiente) y el volumen del edificio se consideran como parámetros principales de cálculo. Las propiedades de las superficies que comprenden la envolvente del edificio influyen en la transferencia total de calor. La forma define los ángulos de las superficies en la envolvente, que afecta a los ángulos solares utilizados en los cálculos de ganancia de calor, las superficies de transferencia de calor con respecto a la dirección de los vientos predominantes y voladizos que afectan el coeficiente de sombra (Premrov, et al., 2015).

Para el presente estudio, se define una forma básica como simplificación de una edificación. Esta consiste en un paralelepípedo de 6x6x2.5 m.

- Las dimensiones generales se han basado en planos usados por el MIDUVI en construcción de edificaciones para el sector rural, Ver Apéndice B.
- Y además se selecciona una geometría bastante simple con el propósito de que el tamaño del edificio modelado no genere conflicto con la suposición de una sola zona térmica, lo que significa que tiene una temperatura uniforme en toda la zona.

Un esquema en Sketchup de este edificio se puede observar en la Figura 2.1, mientras que sus dimensiones se encuentran tabuladas en la Tabla 2.2.

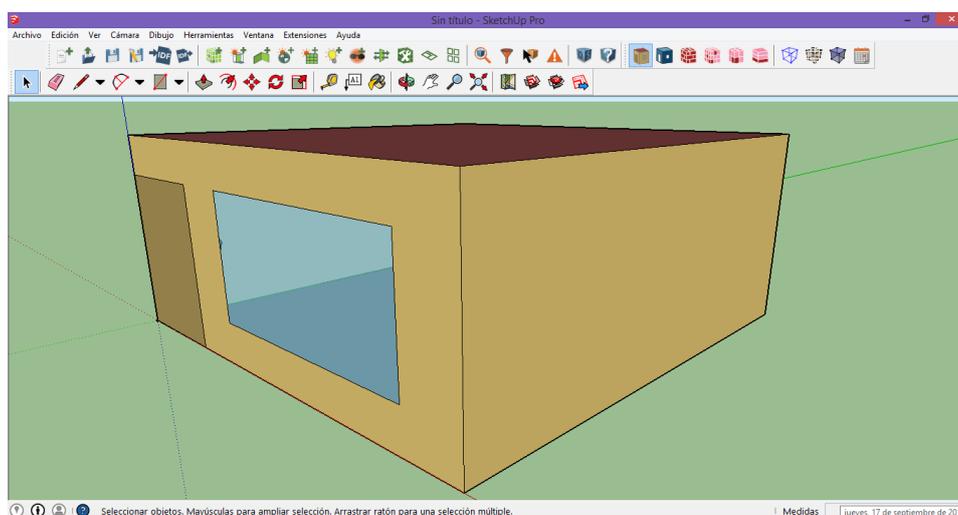


Figura 2.1. Forma del modelo de estudio

Tabla 2.2. Dimensiones generales del modelo

Componente	Descripción
Pared Frontal	6 x 2.5 m (posee ventana y puerta)
Pared Posterior	6 x 2.5 m (posee ventana)
Pared Derecha	6 x 2.5 m
Pared Izquierda	6 x 2.5 m
Piso	6 x 6 m
Techo	6 x 6 m
Ventanas	Variables
Puerta	1.5 x 2 m

2.1.3. PARÁMETROS DE ESTUDIO

Los parámetros a estudiar se eligen, de acuerdo a la revisión bibliográfica y a las recomendaciones dadas en la literatura. Estudios paramétricos posteriores confirmarán la pertinencia de los mismos. Entre los parámetros estudiados se incluyen:

- La orientación de la construcción;
- Porcentaje de acristalamiento;
- Infiltraciones de aire;
- Materiales de techos;
- Materiales de paredes.

2.1.3.1. Orientación de la construcción

La orientación del edificio es un parámetro que muestra su dirección respecto a un eje de referencia, generalmente el norte. Este parámetro afecta a las ganancias solares, y en consecuencia a las cargas térmicas totales de la edificación así como a la presencia de luz natural en los espacios, etc. (Ali & Armstrong, 2008).

La influencia de la orientación se la estudiará mediante la variación del ángulo de la construcción con respecto al norte en el modelo realizado en SketchUp tal como se muestra en la Figura 2.2. Esta variación se la realizará entre 0 y 90° (modelo simétrico) con un intervalo de 30°. Para cada caso se analizará la variación de las condiciones térmicas del modelo.

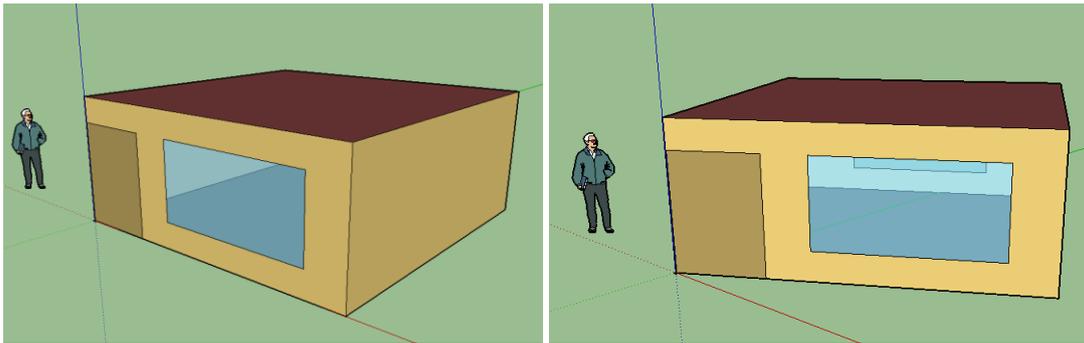


Figura 2.2. Esquema del modelo base y del modelo rotado 60° respecto al eje norte

2.1.3.2. Ventanas

El acristalamiento en edificios suele ser uno de los parámetros fundamentales para el comportamiento energético de los mismos. La ganancia o pérdida de energía proporcionada por las ventanas depende de la conductividad térmica del vidrio, el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), así como la orientación de la ventana (Ehrt et al., 1994).

Se asume que las ventanas estarán construidas de vidrio simple de 5 mm, de espesor. El porcentaje de acristalamiento será variable y se ubicarán en todas las caras del edificio. Las propiedades del vidrio utilizado se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. *Propiedades del vidrio utilizado* (Tudela, 1982),(Monroy, 1995),(JARAMILLO, 2012)

Propiedades del vidrio de ventanas	
Espesor (m)	0,005
Conductividad Térmica (W/m-K)	0,09
Transmitancia solar	0,837
Reflectancia solar	0,075
Transmitancia Visible	0,898
Emisividad	0,84

El estudio de la influencia del acristalamiento se realizará con diferentes configuraciones del tamaño de ventanas respecto a la construcción total. Se realizan seis configuraciones como se indica:

1. Se variará el porcentaje de acristalamiento en las paredes norte y sur desde 0 a 100% del tamaño total de las paredes con un intervalo de 20% manteniendo las paredes este y oeste sin ventanas.
2. Se variará el porcentaje de acristalamiento en las paredes este y oeste desde 0 a 100% del tamaño total de las paredes con un intervalo de 20% manteniendo las paredes norte y sur sin ventanas.
3. Se variará el porcentaje de acristalamiento en la pared este desde 0 a 100% del tamaño total de las paredes con un intervalo de 20% manteniendo las demás paredes sin ventanas.
4. Se variará el porcentaje de acristalamiento en la pared oeste desde 0 a 100% del tamaño total de las paredes con un intervalo de 20% manteniendo las demás paredes sin ventanas.
5. Se variará el porcentaje de acristalamiento en la pared norte desde 0 a 100% del tamaño total de las paredes con un intervalo de 20% manteniendo las demás paredes sin ventanas.
6. Se variará el porcentaje de acristalamiento en la pared sur desde 0 a 100% del tamaño total de las paredes con un intervalo de 20% manteniendo las demás paredes sin ventanas.

2.1.3.3. Infiltraciones

Se trata del aire externo que penetra en el interior de un local a través de grietas y otras aberturas que no han sido colocadas intencionadamente en la envolvente del local. Las infiltraciones también se conocen como fugas de aire que se introducen en el edificio (Sandberg et al., 2015). En la Figura 2.3 se muestra un esquema explicativo de este proceso.

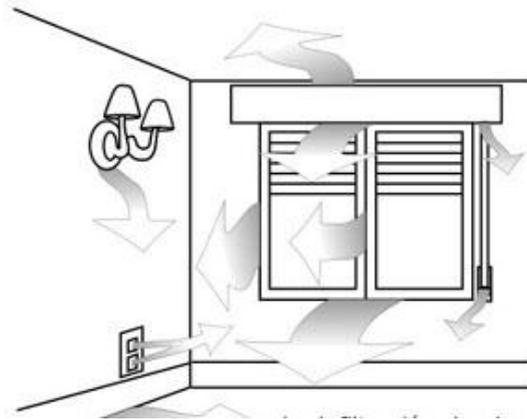


Figura 2.3. Infiltraciones de aire en un edificio (“ARQHYS,” n.d.)

Las infiltraciones se las estudia mediante la variación de las condiciones de simulación en EnergyPlus, en donde se cambia la tasa de infiltraciones desde 0 hasta 3 cambios de aire por hora (ACH), con un intervalo de 0,5 cambios por hora y se analiza su influencia en el ambiente térmico interior del modelo.

2.1.3.4. Materiales

2.1.3.4.1. Techos

Los techos son un componente muy importante de la envolvente del edificio que se debe considerar cuidadosamente en el diseño. Las variables más influyentes en los techos son la radiación solar y los efectos climáticos. La influencia de los techos para la calidad ambiental interior, IEQ en inglés (Enhance Indoor Environmental Quality) es crítica (Castleton, Stovin, Beck, & Davison, 2010).

Para la selección de los materiales del techo a estudiar se toma en cuenta lo siguiente:

- Los materiales de techos que se usan de forma predominante en las viviendas del Ecuador, según los resultados expuestos en el censo de población y vivienda (INEC, 2010), son los techos con base en zinc.
- Además según La Serie de Informes Técnicos creada por el Programa de Políticas Públicas y Salud de la División de Salud y Desarrollo Humano y el Programa de Saneamiento Básico de la División de Salud y Ambiente de la Organización Panamericana de la Salud muestra que a nivel nacional los techos son en su mayoría son de zinc, aunque en la

sierra urbana predominan los techos de hormigón, losa o cemento y, en la sierra rural, la teja es el material más común. (Vieira C. & Galvis G., 2006)

En la actualidad el plywood y gypsum son utilizados en las edificaciones como combinaciones en los techos mencionados anteriormente, por lo cual estos materiales junto a los que muestran las encuestas serán estudiados en el análisis paramétrico, cuyas propiedades se indica en la Tabla 2.4 que se describe a continuación.

Tabla 2.4. Propiedades de los techos que componen el modelo (Tudela, 1982),(Monroy, 1995),(Jaramillo, 2012)

Parámetro/Componente	Material	Espesor (m)	Conductividad Térmica (W/m-K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg-K)
Techo	Zinc	0,0002	111	7130	380
	Concreto Ligero	0,12	0,72	1850	1000
	Teja	0,01	0,8	1800	500
	Gypsum	0,01	0,045	200	1460
	Plywood	0,14	0,14	530	1210

2.1.3.4.2. Paredes

Las paredes constituyen la parte con mayor proporción de la envolvente del edificio, proporcionando confort térmico y acústico. Por esta razón, la resistencia térmica de las paredes influye en gran medida en la transferencia total de calor del edificio (Sadineni, Madala, & Boehm, 2011).

Para la selección de los materiales de las paredes a estudiar se toma en cuenta lo siguiente:

- Los materiales de paredes que se usan de forma predominante en las viviendas del Ecuador, según los resultados expuestos en el censo de población y vivienda (INEC, 2010), son las paredes de bloque y ladrillo.
- Además según La Serie de Informes Técnicos creada por el Programa de Políticas Públicas y Salud de la División de Salud y Desarrollo Humano y el Programa de Saneamiento Básico de la División de Salud y Ambiente de la Organización Panamericana de la Salud muestra que, a nivel nacional, la mayor parte de las personas habita en viviendas que

cuentan con paredes de bloque y ladrillo (el 64%), especialmente en las zonas urbanas. Sin embargo, en la sierra rural, 3 de cada 10 viviendas tienen pared de adobe o tapia. (Vieira C. & Galvis G., 2006)

- En México, Colombia, **Ecuador**, Perú, Bolivia, Argentina y en el sur y norte de Chile las casas de adobe son aun patrimonio de muchas familias humildes, que conservan esta tradición desde tiempos inmemoriales. El centro histórico de Quito cuenta con muchas casas coloniales cuyas paredes son de adobe. Actualmente algunos arquitectos siguen utilizando muros de adobe en combinación con cimientos, columnas y losas de hormigón debido a sus características. (Correa C, 2009)

Por lo cual se estudiarán los tipos de paredes más utilizadas en las edificaciones para la climatología estudiada, entre estas destacan las paredes de adobe, ladrillo y bloque cuyas propiedades se describen en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Propiedades de las paredes que componen el modelo (Monroy, 1995), (Jaramillo, 2012)

Parámetro/ Componente	Material	Espesor (m)	Conductividad Térmica (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor especifico (J/kg-K)
Paredes	Adobe	0,15	0,95	1600	920
	Bloque	0,15	0,49	1200	1050
	Ladrillo	0,15	0,73	1800	920

2.1.3.5. Parámetros fijos de los componentes

Durante el estudio paramétrico, cada parámetro se evaluará independientemente de los otros, por lo cual ciertas variables se mantendrán fijas mientras otras cambian. En la Tabla 2.6 se tabulan los valores de los parámetros que se mantendrán fijos en este estudio. Estos valores se consideran representativos de la vivienda ecuatoriana.

Tabla 2.6. Parámetros fijos de los componentes (Tudela, 1982), (Monroy, 1995), (Jaramillo, 2012)

PARÁMETROS FIJOS							
Componente	Material	Propiedades			Dimensiones		
		Densidad [kg/m ³]	Conductividad [W/m°C]	Calor especifico [J/kgK]	Espesor [cm]	Largo [m]	Ancho [m]

Piso	Concreto	2400	1,6	1050	15	6	6
Puerta	Madera	600	0,14	1210	5	2	1,5
Paredes	Ladrillo	1800	0,73	920	15	6	2,5
Techo	Concreto ligero	1850	0,72	1000	12	6	6

2.2. MODELO FÍSICO

En el presente apartado se muestran las ecuaciones y consideraciones para obtener las variables de estudio del modelo. Las ecuaciones se obtienen aplicando los principios de la transferencia de calor en estado transitorio en conjunto con las condiciones ambientales y de funcionamiento del edificio. La resolución de los sistemas de ecuaciones resultantes y el manejo de datos se lo hace mediante el programa MATLAB.

El modelo se describirá con mayor detalle en las secciones posteriores de este capítulo. El modelo es relativamente simple en comparación con la organización de datos y control que se necesita para simular la gran cantidad de combinaciones de tipos de sistemas, horarios y ambientes.

2.2.1. ESTUDIO DE LA ZONA TÉRMICA.

Una zona térmica puede consistir en una sola habitación o varias habitaciones que tienen características térmicas similares. Así mismo, el aire dentro de la zona se supone a temperatura uniforme.

Bajo esta suposición, la temperatura de la zona térmica puede ser calculada a través de balances de energía para el aire de la zona y al resolver las ecuaciones diferenciales resultantes. El balance de energía horario para una zona térmica se muestra en la ecuación 2.1 (Taylor, Pedersen, & Lawrie, 1990).

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{ci}} Q_{ci_i} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} (T_{si_i} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zon}} \dot{m}_i C_{p_air} (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_{p_air} (T_\infty - T_z) + Q_{sis} \quad (2.1)$$

Dónde:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \text{Energía almacenada en el aire de la zona térmica}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{ci}} Q_{ci_i} = \text{Transferencia de calor por convección entre cargas internas y la zona}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} (T_{si_i} - T_z) = \text{Transferencia de calor por convección entre las superficies internas de los componentes de la envolvente y la zona}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{zon}} \dot{m}_i C_{p,air} (T_{zi} - T_z) = \text{Transferencia de calor debido a la mezcla de aire entre las zonas}$$

$$\dot{m}_{inf} C_{p,air} (T_{\infty} - T_z) = \text{Transferencia de calor debido a la infiltración de aire exterior y la zona}$$

$$Q_{sis} = \text{Transferencia de calor por sistemas de climatización de aire y la zona}$$

Para encontrar la temperatura de la zona térmica en el presente estudio, se considera lo siguiente:

- Existe una única zona térmica
- No se dispone de sistemas de climatización de aire
- No existen cargas internas

Bajo estas suposiciones el balance de energía del modelo se muestra en la ecuación 2.2 y la figura 2.4.

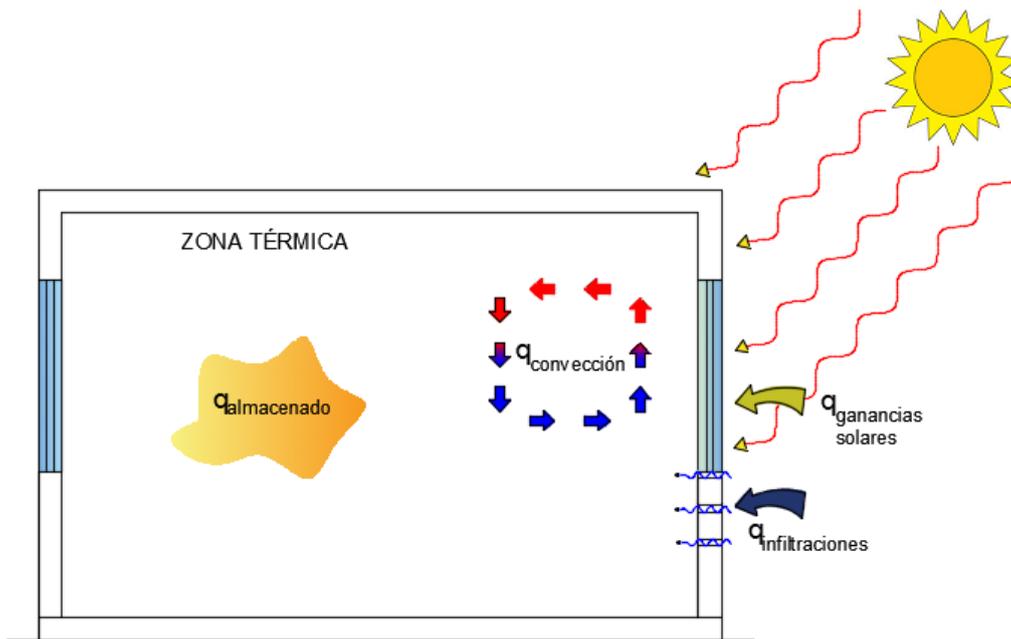


Figura 2.4. Balance de energía en la zona térmica

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} (T_{si} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_{p_{air}} (T_{\infty} - T_z) \quad (2.2)$$

La capacitancia térmica C_z que se relaciona con la cantidad de energía almacenada en la zona se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_z = \rho_{air} V_{zon} C_{p_{air}} \quad (2.3)$$

Para resolver la ecuación 2.2 se utiliza la aproximación de Euler aplicada a las diferencias finitas:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_z^t - T_z^{t-\delta t}}{\delta t} \quad (2.4)$$

La fórmula de Euler se aplica en la ecuación de la zona térmica. Todos los términos que contienen la temperatura media del aire de la zona se agrupan en el lado izquierdo de la ecuación. Dado que los términos restantes no se conocen en el momento actual, se retrasarán por un paso de tiempo y se recogerán en el lado derecho. Aplicando este artificio matemático la ecuación 2.2 se reescribe como:

$$C_z \frac{T_z^t - T_z^{t-\delta t}}{dt} + T_z^t \left(\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} + \dot{m}_{inf} C_{p_air} \right) = \left(\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} + \dot{m}_{inf} C_{p_air} T_\infty \right)^{t-\delta t} \quad (2.5)$$

Posteriormente se realiza una reordenación final de los términos para obtener una expresión explícita de la temperatura del aire de la zona:

$$T_z^t = \frac{\left(C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} T_{si} + \dot{m}_{inf} C_{p_air} T_\infty \right)^{t-\delta t}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left(\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{c,int_i} A_{int_i} + \dot{m}_{inf} C_{p_air} \right)} \quad (2.6)$$

De la ecuación 2.6 las variables desconocidas son las temperaturas superficiales internas (T_{si}) y los coeficientes de convección internos ($h_{c,int}$). En los apartados siguientes se muestra las correlaciones utilizadas para encontrar dichas variables.

2.2.2. CONDUCCIÓN UNIDIMENSIONAL DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO EN LA ENVOLVENTE DEL MODELO

Debido a que el espesor de los componentes de la envolvente del modelo (paredes, techo y piso) son menores que las demás dimensiones, el problema de transferencia de calor a través de los componentes se trata como un problema de conducción unidimensional. En consecuencia la ecuación de la difusión unidimensional y en estado transitorio debe ser resuelta. Esta ecuación es de segundo grado en el espacio y de primer grado en el tiempo, por lo que se requieren dos condiciones de borde y una condición temporal. Esta ecuación, junto con las condiciones de borde, se muestra a continuación (Cengel, 1997):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

Para resolver la ecuación de difusión se recurre a un método de volúmenes finitos. Los esquemas de discretización espacial centrado y de discretización temporal implícito han sido usados. Este método de resolución requiere la formulación de un balance de energía en cada uno de los nodos que compone

la pared. Se distinguen tres tipos de nodos, uno interior y dos de borde. En la figura 2.5 se muestra un esquema de la discretización espacial de la pared junto con las condiciones de borde.

El balance de energía en los nodos, considera lo siguiente:

- La transferencia de calor se supone desde el exterior hacia el nodo.
- La temperatura de cada superficie de la envolvente es uniforme.
- La radiación sobre cada superficie de la envolvente es uniforme.
- El intercambio radiativo entre las superficies internas del modelo es despreciable
- Las propiedades que dependen de la temperatura (conductividad térmica, densidad, calor específico) se consideraran constantes en todo el espesor de los componentes.
- Conducción de calor unidimensional.

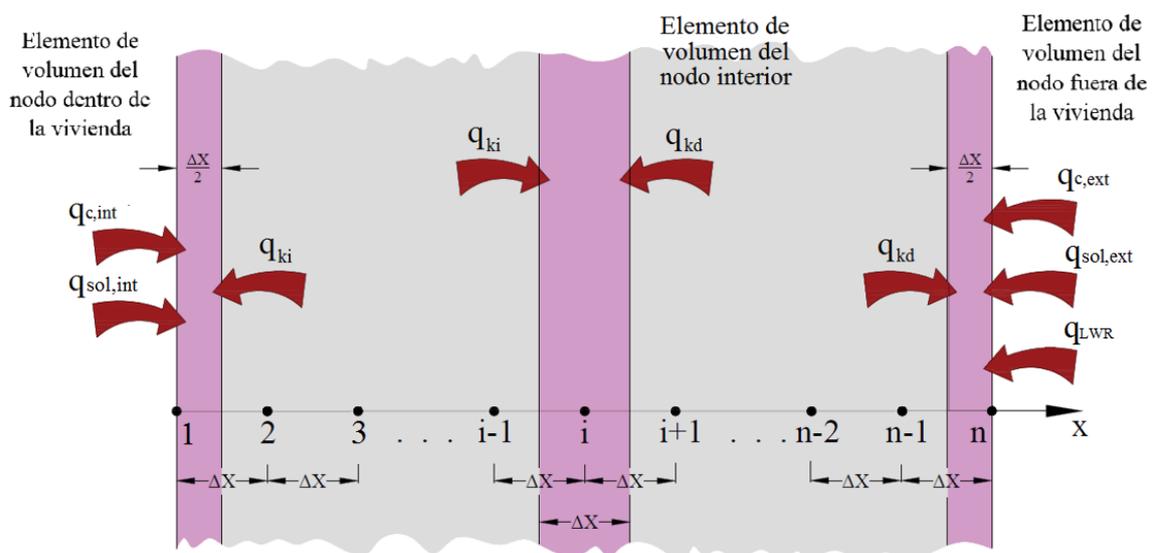


Figura 2.5. Discretización del elemento pared y flujos de calor para cada tipo de nodo

2.2.2.1. Balance de energía en el nodo interior

Por convención la transferencia de calor se supone desde el exterior hacia el nodo. Siguiendo esta convención los dos flujos de calor se suponen positivos.

El balance de energía para este nodo se escribe como:

$$q_{ki} + q_{kd} = \rho_c C_{p,c} A_t \Delta x \frac{T_i^{t+1} - T_i^t}{\Delta t}$$

(2.8)

Aplicando la ley de Fourier, se puede reescribir las transferencias de calor como (Cengel, 1997).

$$kA \frac{T_{i-1}^{t+1} - T_i^{t+1}}{\Delta x} + kA \frac{T_{i+1}^{t+1} - T_i^{t+1}}{\Delta x} = \rho_c C_{p,c} A_t \Delta x \frac{T_1^{t+1} - T_1^t}{\Delta t}$$
(2.9)

Se define el número de Fourier como un tiempo adimensional infinitesimal de la siguiente manera:

$$Fo = \frac{\Delta t \alpha}{(\Delta x)^2}$$
(2.10)

Ordenando e introduciendo el número de Fourier en la ecuación resulta:

$$-Fo T_{i-1}^{t+1} + (1 + 2Fo) T_i^{t+1} - Fo T_{i+1}^{t+1} = T_i^t$$
(2.11)

Donde:

i = Índice de nodo

t = Índice de Tiempo

2.2.2.2. Balance de energía en el nodo exterior dentro de la vivienda

El balance de energía en este nodo toma en cuenta la condición de borde de convección dentro de la vivienda. Este balance de energía se escribe a continuación:

$$q_{sol,int} + q_{ki} + q_{c,int} = \rho_c C_{p,c} A_{int} \frac{\Delta x}{2} \frac{T_i^{t+1} - T_i^t}{\Delta t}$$
(2.12)

Donde la transferencia de calor por convección se encuentra aplicando la ley de enfriamiento de Newton (Cengel, 1997).

$$q_{c,int} = h_{c,int} A_{int} (T_z^{t+1} - T_1^{t+1})$$

(2.13)

2.2.2.2.1. Radiación solar dentro de la vivienda

El flujo de calor de radiación solar de onda corta absorbida por la superficie interna de los componentes del modelo (piso, paredes y techo), es una combinación de la radiación directa y difusa que ingresa a través de las ventanas y está dada por la ecuación (Groth & Lokmanhekim, 1969):

$$q''_{sol,int} = \alpha_s q''_{df} + f_{ir} I_b \quad (2.14)$$

El flujo de calor de radiación difusa de onda corta, q''_{df} se asume está distribuido uniformemente sobre los componentes dentro de la zona y se calcula de la siguiente manera:

$$q''_{df} = \frac{q_{dft}}{\sum_{i=1}^{N_{sup}} \alpha_{s_i} A_{int_i}} \quad (2.15)$$

La radiación difusa total que entra a la zona a través de las ventanas q_{dft} es función de la transmitancia solar de la ventana τ , la superficie soleada de la ventana A_{sv} , el coseno del ángulo de incidencia de la ventana θ y un factor de sombra f_s que depende de proyecciones de sombra exteriores sobre las ventanas y divisiones de la ventana dados por marcos, en el modelo de estudio no existen marcos ni voladizos por lo tanto el factor de sombra es la unidad, $f_s = 1$; así la radiación difusa total se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_{dft} = I_{tf} \sum_{i=1}^{N_{v,ext}} \tau_i A_{sv_i} \cos(\theta_i) f_{s_i} \quad (2.16)$$

En donde la irradiancia total difusa I_{tf} es la suma de la irradiancia solar difusa entre la superficie y el cielo, la superficie y el suelo, y la radiación directa (que se transforma en difusa al ingresar en la zona) de la siguiente manera:

$$I_{tf} = I_b + I_s + I_g$$

(2.17)

La radiación solar directa que ingresa por las ventanas y es absorbida por la superficie interna de los componentes depende de un factor de irradiación directa f_i y de la irradiancia solar directa I_b de la está dado por la siguiente ecuación:

$$f_{ir} = \frac{\alpha_s}{A_{int}} \sum_{i=1}^{N_{ve}} \tau_i A_{ir_i} \cos(\theta_i)$$

(2.18)

El área irradiada A_{ir} es la proyección de la superficie de la ventana por la cual ingresa la radiación directa hacia las superficies de los componentes. El área irradiada depende de la posición del sol, la geometría de las superficies interiores y la localización de las ventanas en el modelo.

Existen diferentes algoritmos para determinar el área irradiada y su distribución en los componentes de la zona, para el presente estudio se ha utilizado el algoritmo *MinimalShadowing*, (Boji, Kostić, & Cvetković, 2012) el cual consiste en asumir que toda la radiación que ingresa por las ventanas del modelo incide sobre el piso donde se absorbe dependiendo de su absorptancia, además la proyección del área irradiada de las ventanas sobre el piso es igual a la superficie soleada de la ventana. Este criterio permite disminuir el gasto computacional, debido a que no se determina la distribución del área irradiada sobre las superficies internas del modelo.

2.2.2.2.2. Ángulo de incidencia del sol (θ)

La posición del sol en el cielo es expresada en términos del ángulo de altitud solar (β) por encima de la horizontal y el ángulo solar azimutal (ϕ) medido desde el sur (Figura 2.6). Estos ángulos a su vez dependen de la latitud local (l), la declinación solar (δ) que es una función de la fecha (Tabla 2.7) y el tiempo solar aparente expresado como el ángulo horario (H), (El sol se mueve $0,25^\circ$ cada minuto) (ASHRAE, *Handbook—Fundamentals*, 2009).

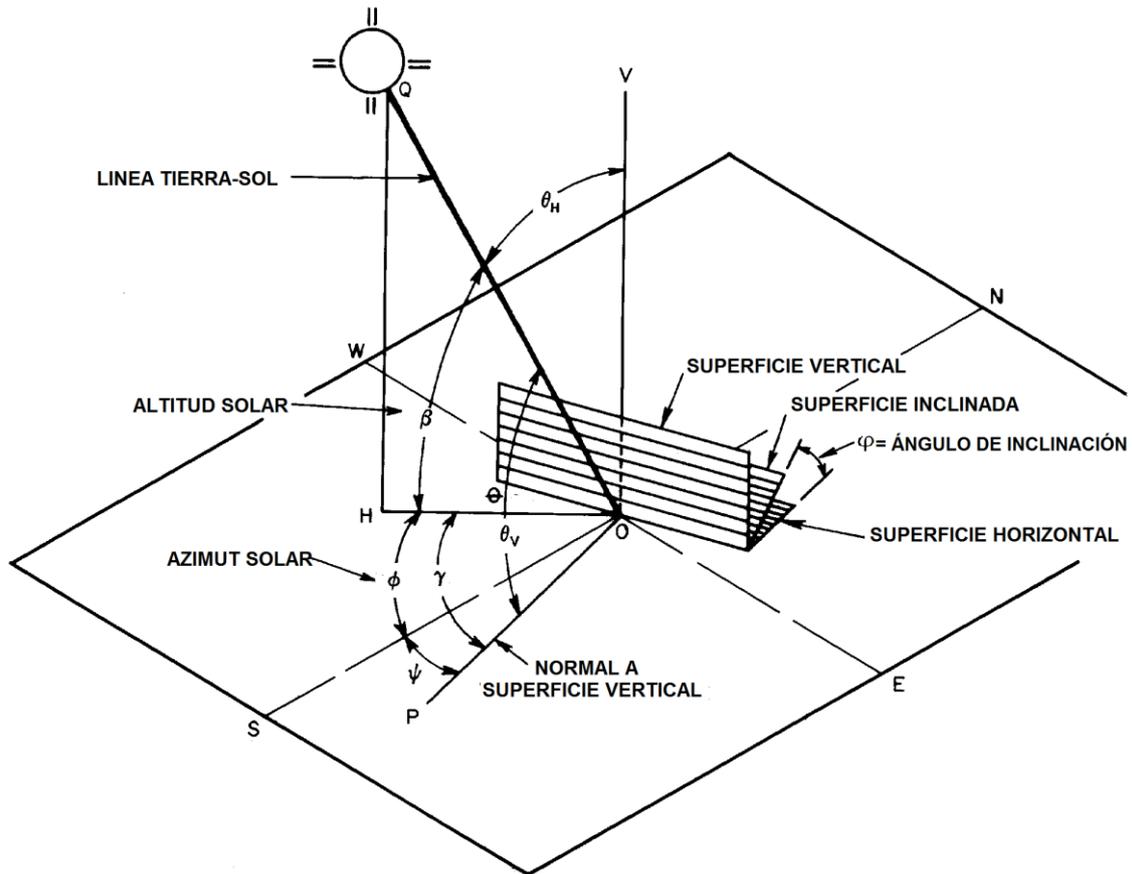


Figura 2.6. Ángulos solares para superficies verticales y horizontales (ASHRAE Handbook—Fundamentals, 2009).

Tabla 2.7. Angulo de declinación solar (ASHRAE Handbook—Fundamentals, 2009)

Mes	Angulo de declinación solar (δ)
Enero	-20
Febrero	-10,8
Marzo	0
Abril	11,6
Mayo	20
Junio	23,45
Julio	20,6
Agosto	12,3
Septiembre	0
Octubre	-10,5
Noviembre	-19,8
Diciembre	-23,45

Las ecuaciones 2.19 y 2.20 relacionan (β) y (ϕ) con los tres ángulos antes mencionados.

$$\sin \beta = \cos l \cos \delta \cos H + \sin l \sin \delta$$

(2.19)

$$\cos \emptyset = \frac{\sin \beta \sin \iota - \sin \delta}{\cos \beta \cos \iota} \quad (2.20)$$

La Figura 2.6 muestra los ángulos de posición e incidencia solar para superficies tanto verticales como horizontales. La línea OQ conduce al sol, la línea OV es perpendicular al plano horizontal sobre el cual se encuentra el ángulo solar azimutal HOS y el ángulo azimutal de superficie POS (ψ). El ángulo HOP es el ángulo solar azimutal de superficie y se define como:

$$\gamma = \emptyset - \psi \quad (2.21)$$

El ángulo solar azimutal \emptyset es positivo para horas de la tarde y negativo para horas de la mañana. Del mismo modo, las superficies que miran hacia el oeste tienen un ángulo azimutal de superficie ψ positivo; aquellas que miran al este tienen un ángulo azimutal de superficie negativo (Tabla 2.8.). Si γ es mayor que 90° o inferior a 270° , la superficie está en la sombra. La Tabla 2.8 proporciona los valores en grados para el ángulo azimutal de superficie, aplicable a las orientaciones de interés.

Tabla 2.8. *Angulo azimutal de superficie* (ASHRAE Handbook—Fundamentals, 2009)

Orientación	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Angulo azimutal de superficie (ψ)	180°	-135°	-90°	-45°	0°	45°	90°	135°

El ángulo de incidencia (θ) para cualquier superficie se define como el ángulo entre los rayos solares incidentes y la línea normal a dicha superficie. Para una superficie horizontal el ángulo de incidencia (θ) es QOV; para la superficie vertical el ángulo de incidencia (θ) es QOP. Para cualquier superficie, el ángulo de incidencia (θ) está relacionado con (β), (γ) y el ángulo de inclinación de la superficie (φ) que se muestra a continuación:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \varphi + \sin \beta \cos \varphi \quad (2.22)$$

Para superficies horizontales $\varphi = 0^\circ$

$$\cos \theta_H = \sin \beta \quad (2.23)$$

Para superficies verticales $\varphi = 90^\circ$

$$\cos \theta_v = \cos \beta \cos \gamma \quad (2.24)$$

2.2.2.2.3. Coeficiente de convección dentro de la vivienda

Existen diferentes modelos que se utilizan para el cálculo del coeficiente de convección, que dependen principalmente de las condiciones de flujo dentro de la zona. La transferencia de calor por convección natural sobre una superficie depende de la configuración geométrica de ésta así como de su orientación. También depende de la variación de la temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene.

La correlación para encontrar el coeficiente de convección interno, se encuentra en términos del número de Nusselt como se muestra en la siguiente ecuación (Cengel, 1997):

$$h_{c,int} = \frac{Nu k_{air}}{L_c} \quad (2.25)$$

Las correlaciones para encontrar el número de Nusselt dependen de la configuración geométrica de la superficie y del régimen de flujo, el cual se caracteriza por el rango del número de Rayleigh. El número de Nusselt es función del número de Rayleigh, el cual es el producto de los números de Grashof y de Prandtl (Cengel, 1997).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta_{air} |\Delta T_{int}| L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (2.26)$$

La longitud característica L_c es igual a la altura en una pared vertical y en una superficie horizontal es igual al cociente entre el área superficial interna A_{int} y el perímetro P ($L_c = \frac{A_{int}}{P}$).

Para encontrar el número de Nusselt en una pared vertical para cualquier intervalo del número de Rayleigh, se utiliza la siguiente correlación:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (2.27)$$

Para una superficie orientada hacia arriba y una diferencia de temperatura positiva ($\Delta T_i > 0.0$); o una superficie orientada hacia abajo y una diferencia de temperatura negativa ($\Delta T_i < 0.0$) se utiliza las siguientes correlaciones (Cengel, 1997):

$$Nu = 0.54 Ra_L^{1/4}; \quad \text{para } 10^4 \leq Ra_L < 10^7 \quad (2.28)$$

$$Nu = 0.15 Ra_L^{1/3}; \quad \text{para } 10^7 \leq Ra_L < 10^{11} \quad (2.29)$$

Para una superficie orientada hacia arriba y una diferencia de temperatura negativa ($\Delta T < 0.0$); o una superficie orientada hacia abajo y una diferencia de temperatura positiva ($\Delta T > 0.0$) se utiliza la siguiente correlación (Cengel, 1997):

$$Nu = 0.27 Ra_L^{1/4}; \quad \text{para } 10^5 \leq Ra_L < 10^{11} \quad (2.30)$$

2.2.2.2.4. Coeficiente de convección para ventanas dentro de la vivienda

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección de las ventanas en el interior de la vivienda se ha utilizado la Norma ISO 15099-2003 (ASHRAE Handbook - Fundamentals, 2009). Esta norma incluye las ecuaciones para el coeficiente de convección para una superficie con cualquier ángulo de inclinación. La correlación ISO 15099 se determina en términos del número de Nusselt como se muestra en la siguiente ecuación (ISO 15099, 2003):

$$h_{v,int} = Nu_v \left(\frac{k_{air}}{H} \right) \quad (2.31)$$

El número de Rayleigh basado en la altura de la ventana, Ra_H se calcula:

$$Ra_H = \frac{\rho_{air}^2 H^3 g c_p |\Delta T_{int}|}{T_{m,f} \nu k_{air}} \quad (2.32)$$

Las propiedades de los materiales se evalúan a una temperatura media $T_{m,f}$.

$$T_{m,f} = T_z + \frac{1}{4}(T_{si} - T_z) \quad (2.33)$$

El número de Nusselt varía según el ángulo de inclinación de la superficie. En la aplicación del modelo para un ángulo de inclinación en grados φ de $0^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$, se define un número de Rayleigh basado en el ángulo de inclinación de la superficie.

$$Ra_\varphi = 2,5 \times 10^5 \left(\frac{e^{0.72 \varphi}}{\sin \varphi} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.34)$$

$$Nu = 0,56(Ra_H \sin \varphi)^{1/4}; \quad \text{para } Ra_H \leq Ra_\varphi \quad (2.35)$$

$$Nu = 0,13(Ra_H^{\frac{1}{3}} - Ra_\varphi^{\frac{1}{3}}) + 0,56(Ra_\varphi \sin \varphi)^{\frac{1}{4}}; \quad \text{para } Ra_H > Ra_\varphi \quad (2.36)$$

La conductividad térmica del aire se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$k_{air} = 2,873 \times 10^{-3} + 7,76 \times 10^{-8} T_{m,f} \quad (2.37)$$

Y la viscosidad cinemática del aire se calcula utilizándola siguiente ecuación:

$$\nu = 3,723 \times 10^{-6} + 4,94 \times 10^{-8} T_{m,f} \quad (2.38)$$

Finalmente aplicando la ley de Fourier, la ley de enfriamiento de Newton y reemplazando las demás ecuaciones en el balance de energía se tiene:

$$q''_{sol,int} A_{int} + \frac{kA_{int}}{\Delta x} (T_2^{t+1} - T_1^{t+1}) + h_{c,int} A_{int} (T_z^{t+1} - T_1^{t+1}) = \rho_c C_{p,c} A_{int} \frac{\Delta x}{2} \frac{T_1^{t+1} - T_1^t}{\Delta t} \quad (2.39)$$

Así mismo se tiene que:

$$Bi_{c,int} = \frac{h_{c,int} \Delta x}{k} \quad (2.40)$$

$$Fo = \frac{\Delta t \alpha}{(\Delta x)^2} \quad (2.41)$$

Finalmente reemplazando las Ecuaciones 2.40 y 2.41 en la Ecuación 2.39 y simplificando se obtiene:

$$(1 + 2Fo + 2Bi_{c,int} Fo) T_1^{t+1} - 2Fo T_2^{t+1} - 2Bi_{c,int} Fo T_z^{t+1} = T_1^t + 2Fo \frac{\Delta x}{k} q''_{sol,int} \quad (2.42)$$

2.2.2.3. Balance de energía en el nodo exterior fuera de la vivienda

La energía absorbida o evacuada por la superficie exterior de la pared difiere de la superficie interior. En esta superficie, la radiación solar (onda corta) incide directamente. Una parte de esta energía será absorbida por la pared aumentando su temperatura. Esta energía se transmitirá hacia el interior por conducción y hacia el exterior por convección y por radiación (onda larga). El balance de energía de este nodo ($i = n$) puede expresarse como (ASHRAE, *Handbook—Fundamentals*, 2009):

$$q_{sol,ext} + q_{LWR} + q_{c,ext} + q_{kd} = \rho_c C_{p,c} A_{ext} \frac{\Delta x}{2} \frac{T_n^{t+1} - T_n^t}{\Delta t} \quad (2.43)$$

Cada uno de los términos del balance de energía se estudia brevemente a continuación:

2.2.2.3.1. Radiación solar directa y difusa externa (onda corta)

El flujo de calor de radiación solar de onda corta se ve influenciado por la ubicación, superficie, ángulo de incidencia, las propiedades del material,

condiciones climáticas, etc. La ganancia solar de onda corta total para cualquier superficie exterior es una combinación de la radiación solar difusa y directa y está dada por (Underwood & Yik, 2004):

$$q''_{sol,ext} = \alpha_s (I_b \cos(\theta) \frac{A_s}{A_{ext}} + I_s F_{sky} + I_g F_{gnd}) \quad (2.44)$$

Para la superficie de un edificio ubicado sobre un plano cualquiera se definen los factores de vista con el cielo y el suelo así:

$$F_{sky} = \frac{1 + \cos \varphi}{2} \quad (2.45)$$

Y

$$F_{gnd} = \frac{1 - \cos \varphi}{2} \quad (2.46)$$

2.2.2.3.2. Radiación externa de onda larga

Es una formulación estándar de intercambio de radiación entre una superficie, el cielo y la tierra. El flujo de calor de radiación se calcula a partir de la capacidad de absorción de la superficie, temperatura de la superficie, temperatura del suelo, el cielo, y otros factores visibles del cielo y la tierra.

El intercambio de calor entre las superficies de radiación de onda larga es dependiente de temperaturas de la superficie, las relaciones espaciales entre las superficies, sus alrededores, y propiedades del material de las superficies. Las propiedades relevantes de los materiales de la superficie como la emisividad y la absorptividad, son funciones complejas de la temperatura, el ángulo y longitud de onda para cada superficie involucrada. Sin embargo con los estudios de Chapman (1984) y Lienhard (1981) se acordó unas suposiciones razonables para cálculos de cargas de edificaciones que son:

- Cada superficie emite o refleja de forma difusa y es de color gris y opaco.
- Cada superficie está a una temperatura uniforme.

- El flujo de energía dejado en una superficie se distribuye de manera uniforme en toda la superficie.
- El medio dentro de la envolvente no interfiere.

Con el uso de los supuestos anteriormente mencionados, se puede determinar el flujo de calor de radiación de onda larga en la superficie exterior del edificio. El flujo total de calor por radiación de onda larga es la suma de los componentes debido al intercambio de radiación con la tierra, el cielo y el aire, como muestra la siguiente ecuación (Taylor et al., 1990):

$$q''_{LWR} = q''_{gnd} + q''_{sky} + q''_{air} \quad (2.47)$$

Aplicando la Ley de Stefan-Boltzmann para cada componente se tiene:

$$q''_{LWR} = \varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{gnd}^4 - T_{se}^4) + \varepsilon\sigma F_{sky}(T_{sky}^4 - T_{se}^4) + \varepsilon\sigma F_{air}(T_{\infty}^4 - T_{se}^4) \quad (2.48)$$

Se introducen los coeficientes de transferencia de calor radiativo linealizado para hacer que la ecuación anterior más compatible con la formulación de balance de calor.

$$q''_{LWR} = h_{r,gnd}(T_{gnd} - T_{se}) + h_{r,sky}(T_{sky} - T_{se}) + h_{r,air}(T_{\infty} - T_{se}) \quad (2.49)$$

La temperatura de la superficie externa es igual a la temperatura del nodo n en un determinado tiempo, aplicando diferencias finitas se tiene:

$$q''_{LWR} = h_{r,gnd}(T_{gnd}^{t+1} - T_n^{t+1}) + h_{r,sky}(T_{sky}^{t+1} - T_n^{t+1}) + h_{r,air}(T_{\infty}^{t+1} - T_n^{t+1}) \quad (2.50)$$

Los factores de vista de onda larga de la tierra y el cielo se calculan con las ecuaciones 2.45 y 2.46 (Walton, 1983).

La temperatura de la superficie del suelo se supone que es la misma que la temperatura del aire. Las formas finales de los coeficientes de transferencia de calor por radiación aplicando diferencias finitas se muestran:

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon\sigma F_{gnd}((T_n^{t+1})^4 - (T_\infty^{t+1})^4)}{T_n^{t+1} - T_\infty^{t+1}} \quad (2.51)$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon\sigma F_{sky}F_d((T_n^{t+1})^4 - (T_\infty^{t+1})^4)}{T_n^{k+1} - T_\infty^{k+1}} \quad (2.52)$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon\sigma F_{sky}(1 - F_d)((T_n^{t+1})^4 - (T_\infty^{t+1})^4)}{T_n^{t+1} - T_\infty^{t+1}} \quad (2.53)$$

$$F_d = \sqrt{0,5(1 + \cos \varphi)} \quad (2.54)$$

2.2.2.3.3. Coeficiente de convección fuera de la vivienda.

El coeficiente de convección externa $h_{c,ext}$ está influenciado por la convección natural y forzada sobre la superficie exterior, se utilizan en conjunto los modelos de Walton, (Walton, 1983) y MoWitt (Yazdanian & Klems, 1994), para encontrar el coeficiente de convección natural h_n y forzado h_f , respectivamente. El modelo MoWitt (Mobile Window Thermal Test), se basa en estudios realizados sobre superficies lisas en edificios pequeños, así el coeficiente que se calcula inicialmente es un coeficiente de convección para superficies lisas $h_{c,ls}$, el cual se lo utiliza directamente para encontrar el coeficiente de convección externo en las ventanas, por tratarse de una superficie lisa.

Para una superficie una superficie lisa el coeficiente de convección se calcula con la siguiente ecuación (Yazdanian & Klems, 1994):

$$h_{c,ls} = \sqrt{h_n^2 + h_f^2} \quad (2.55)$$

El coeficiente de convección natural externo para ventanas y paredes verticales se lo calcula utilizando los mismos modelos que para el coeficiente de convección interno con las ecuaciones del apartado 2.2.2.2.4, tomando en consideración que la superficie exterior del techo está orientada hacia arriba.

El coeficiente de convección forzado es función de la velocidad del viento (Ecuación 2.56) y coeficientes relacionados con la dirección del viento, ya sea en sotavento o barlovento como se muestra en la Tabla 2.9 y en la Figura 2.7 según de la dirección del viento proporcionada por el archivo meteorológico.

$$h_f = a V_z^b$$

(2.56)

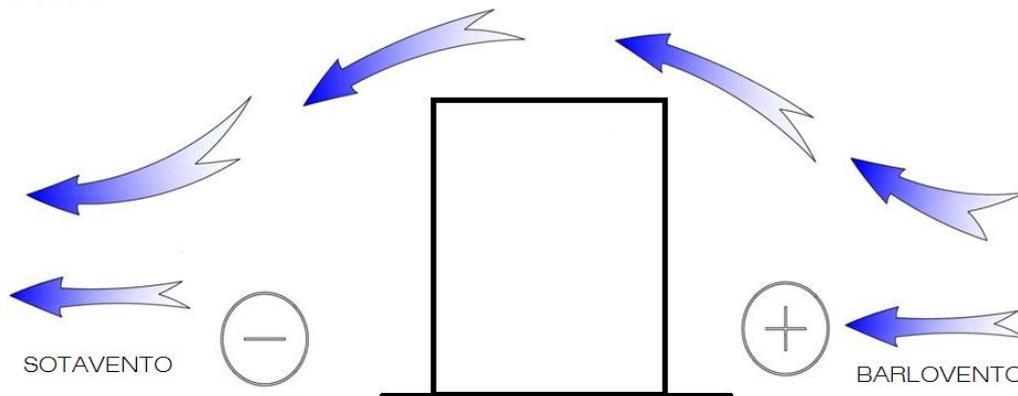


Figura 2.7. Comportamiento del viento sobre una edificación en barlovento y sotavento

Tabla 2.9. Coeficientes de la dirección del viento (Yazdanian & Klems, 1994)

Dirección del viento	a	b
Barlovento	3.26	0.89
Sotavento	3.55	0.617

Para poder aplicar la velocidad del viento medida en la estación meteorológica en el modelo, esta velocidad debe ser extrapolada a otras altitudes (ASHRAE, *Handbook—Fundamentals*, 2009) mediante la ecuación:

$$V_z = V_{met} \left(\frac{z_{met}}{z} \right)^{\xi_{met}} \left(\frac{z}{\zeta} \right)^{\xi}$$

(2.57)

Estos coeficientes dependen de la rugosidad característica y perfiles de velocidad del terreno alrededor de la estación meteorológica. En la tabla 2.10 se muestra los coeficientes de los perfiles de velocidad.

Tabla 2.10. Coeficientes del perfil de velocidad (ASHRAE, *Handbook—Fundamentals*, 2009)

Características del terreno	Exponente, ξ	Espesor de la capa límite, ζ (m)
Campo abierto, terreno plano	0.14	270
Terreno boscoso	0.22	370
Pueblos y ciudades	0.33	460
Océano	0.10	210
Terreno industrial	0.22	370

Las características del terreno en donde se ubica la estación meteorológica corresponden a un campo abierto y para la ubicación del modelo se considera la característica del terreno como pueblos y ciudades debido a las características de la ciudad, quedando los coeficientes para el modelo como indica la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Coeficientes del perfil de velocidad (ASHRAE Fundamentals, 2005)

Coeficientes utilizados en el modelo de estudio	
ξ_{met}	0.14
ζ_{met}	270 (m)
z_{met}	10
ξ	0.33
ζ	460 (m)
z	1.25

Una vez encontrado el coeficiente de convección para superficies lisas $h_{c,ls}$, para el cálculo del coeficiente de convección externo en las paredes y el techo se utiliza un coeficiente de rugosidad R_f que se muestra en la tabla 2.12, mediante la siguiente ecuación:

$$h_{c,ext} = h_n + R_f(h_{c,ls} - h_n) \quad (2.58)$$

Tabla 2.12. Coeficientes de rugosidad. (ASHRAE Fundamentals 2005)

Índice de rugosidad	Rf	Ejemplo de Material
Muy rugoso	2.17	Estuco
Rugoso	1.67	Ladrillo
Medio rugoso	1.52	Concreto
Medio liso	1.13	Madera
Liso	1.11	Yeso
Muy liso	1.00	Vidrio

Reemplazando las ecuaciones en el balance de energía de este nodo se tiene:

$$q''_{sol,ext}A_{ext} + q''_{LWR}A_{ext} + h_{c,ext}A_{ext}(T_{\infty}^{t+1} - T_n^{t+1}) + \frac{kA_{ext}}{\Delta x}(T_{n-1}^{t+1} - T_n^{t+1}) = \rho C_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_n^{t+1} - T_n^t}{\Delta t} \quad (2.59)$$

Definiendo diferentes números de Biot y el número de Fourier:

$$Bi_{c,ext} = \frac{h_{c,ext}\Delta x}{k} \quad (2.60)$$

$$Bi_{r,gnd} = \frac{h_{r,gnd}\Delta x}{k} \quad (2.61)$$

$$Bi_{r,sky} = \frac{h_{r,sky}\Delta x}{k} \quad (2.62)$$

$$Bi_{r,air} = \frac{h_{r,air}\Delta x}{k} \quad (2.63)$$

$$Fo = \frac{\Delta t\alpha}{(\Delta x)^2} \quad (2.64)$$

Y finalmente reemplazando estas ecuaciones en la ecuación 2.55 y simplificando se tiene:

$$\begin{aligned} & -2FoT_{n-1}^{t+1} + (1 + 2Fo + 2FoBi_{c,ext} + 2FoBi_{r,gnd} + 2FoBi_{r,sky} + 2FoBi_{r,air})T_n^{t+1} \\ & = T_n^t + 2FoBi_{c,ext}T_\infty^{t+1} + 2FoBi_{r,gnd}T_{gnd}^{t+1} + 2FoBi_{r,sky}T_{sky}^{t+1} + 2FoBi_{r,air}T_\infty^{t+1} + 2Fo\frac{\Delta x}{k}q''_{sol,ext} \end{aligned} \quad (2.62)$$

2.2.3. ECUACIONES RESULTANTES

Luego de realizar el análisis de la conducción de calor para cualquier nodo interior de la pared y el balance de energía sobre los volúmenes de control alrededor de los nodos superficiales, la forma implícita de las ecuaciones en diferencias finitas es:

$$-Fo T_{i-1}^{t+1} + (1 + 2Fo) T_i^{t+1} - Fo T_{i+1}^{t+1} = T_i^t \quad (2.11)$$

$$(1 + 2Fo + 2Bi_{c,int}Fo)T_1^{t+1} - 2FoT_2^{t+1} = T_1^t + 2Bi_{c,int}FoT_z^{t+1} + 2Fo\frac{\Delta x}{k}q''_{sol,int} \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} & -2FoT_{n-1}^{t+1} + (1 + 2Fo + 2FoBi_{c,ext} + 2FoBi_{r,gnd} + 2FoBi_{r,sky} + 2FoBi_{r,air})T_n^{t+1} \\ & = T_n^t + 2FoBi_{c,ext}T_\infty^{t+1} + 2FoBi_{r,gnd}T_{gnd}^{t+1} + 2FoBi_{r,sky}T_{sky}^{t+1} + 2FoBi_{r,air}T_\infty^{t+1} + 2Fo\frac{\Delta x}{k}q''_{sol,ext} \end{aligned} \quad (2.62)$$

Utilizando una discretización en el espacio de n nodos, se obtendrá un sistema de n ecuaciones, (n =Número de nodos) que deben resolverse simultáneamente

para cada incremento de tiempo. Para resolver este sistema de ecuaciones se utilizará el método de inversión de matrices, expresando las ecuaciones en la forma $[A][T] = [C]$. Donde:

$$[T] = [A]^{-1}[C] \tag{2.63}$$

$[A]$ = Matriz tridiagonal de coeficientes de temperaturas nodales

$[T]$ = Vector de temperaturas nodales

$[C]$ = Vector de valores concerniente a las condiciones del problema

El proceso de resolución sistemas de ecuaciones se detalla en el capítulo 3, la figura 3.1 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado en MATLAB, el cual se utiliza para, mediante un proceso iterativo encontrar las temperaturas superficiales, temperatura de la zona y calcular los coeficientes de convección, variables que dependen entre sí, hasta llegar a una convergencia.

CAPÍTULO III

VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo desarrollado en Matlab será validado numéricamente mediante comparación con un modelo desarrollado en EnergyPlus. Para la comparación de los modelos se tomarán como parámetros de referencia a la temperatura del aire de la zona interna del edificio y a las temperaturas superficiales de las paredes, ventanas, techo y puerta.

3.1. CONSIDERACIONES EN EL MODELO DE MATLAB Y UTILIZADAS POR ENERGYPLUS.

En este apartado se describen las consideraciones que utilizan los modelos de EnergyPlus y de Matlab, se muestran los algoritmos utilizados para encontrar los parámetros que intervienen en el cálculo de la temperatura de la zona interna (coeficientes de convección, ganancias solares, conducción de calor) del modelo las cuales se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del modelo de Matlab y EnergyPlus

Parámetro	Modelo Matlab	EnergyPlus
Datos de entrada	Archivo meteorológico del Distrito Metropolitano de Quito. Geometría de la edificación. Propiedades de los materiales	Archivo meteorológico del Distrito Metropolitano de Quito. Geometría de la edificación. Propiedades de los materiales
Zona térmica	Método de balance de energía horario (Taylor et al., 1990)	Método de balance de energía horario.
Ganancias solares internas	Algoritmo Minimal Shadowing (Groth & Lokmanhekim, 1969)	Algoritmo Minimal Shadowing
Conducción a través de los componentes de la envolvente	Método de volúmenes finitos.(Cengel, 1997)	Función de transferencia para conducción. (CTF en inglés)

Coeficiente de convección dentro del modelo	Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies. (Cengel, 1997)	Algoritmo TARP, Thermal Analysis Research Program.
Coeficiente de convección interno en ventanas	Correlación ISO 15099. (ISO 15099, 2003)	Correlación ISO 15099.
Coeficiente de convección exterior	Algoritmo Adaptativo MoWitt.(Yazdanian & Klems, 1994)	Algoritmo Adaptativo MoWitt. (Mobile Window Thermal Test)
Coeficiente de convección externo en ventanas	Algoritmo MoWitt.(Yazdanian & Klems, 1994)	Algoritmo MoWitt. (Mobile Window Thermal Test)
Ganancia solar en la superficie externa	Algoritmo de sombras y radiación; Radiación solar de onda corta y onda larga (Underwood & Yik, 2004)	Algoritmo de sombras y radiación.

EnergyPlus utiliza determinadas correlaciones para el cálculo de las variables de salida de los modelos de comportamiento térmico para edificaciones, los algoritmos y correlaciones que emplea EnergyPlus se describen en la documentación del programa (US Department Of Energy, 2010). Para el desarrollo del modelo en Matlab se utilizan ciertas correlaciones que también utiliza EnergyPlus, las cuales han sido estudiadas para incluirlas en el modelo de Matlab entre las cuales se encuentran el método de balance de energía horario, las correlaciones para el cálculo de coeficientes de convección externos en los componentes de la envolvente del modelo (ventanas, techo, paredes y puerta) y las ganancias solares en las superficie internas y externas (Ver tabla 3.1). Los dos modelos difieren en el uso de modelo para conducción en los componentes de la envolvente, EnergyPlus emplea una función de transferencia de conducción y el modelo de Matlab emplea el método de diferencias finitas, también se utilizan diferentes correlaciones para el cálculo de los coeficientes de convección en las superficies interiores del modelo.

Los datos de entrada dados por el archivo meteorológico, la geometría del modelo y las propiedades de los materiales son las mismas en los dos modelos.

3.2. DESARROLLO DEL MODELO DE REFERENCIA EN ENERGYPLUS.

Para la elaboración del modelo de edificio en EnergyPlus se utilizó la siguiente metodología:

- Con la ayuda del Plug-in de OpenStudio para SketchUp se dibujó la edificación referencial (las dimensiones se indican posteriormente). De esta manera se define la zona térmica del edificio a estudiar.
- Una vez dibujada la geometría de edificio se guarda el archivo .osm (OpenStudio Model) que puede ser exportado como archivo de entrada de datos de EnergyPlus (.idf), que será el archivo editable sobre el cual de realizarán los estudios en EnergyPlus.

Realizados los pasos anteriores se dispone de un archivo en EnergyPlus (.idf) que contiene la geometría del modelo de edificio que se quiere simular. Los pasos siguientes serán para ingresar las propiedades restantes, simular el modelo y extraer resultados de la simulación.

- Al abrir el modelo en EnergyPlus se visualiza la interface **EP-Launch** que es la ventana principal de EnergyPlus donde, entre otras opciones, se puede editar el modelo, seleccionar el archivo climático, visualizar los resultados y simular. Para definir los parámetros del modelo primero se debe abrir el **Edit-IDF Editor**.
- En el **IDF Editor** se ingresan las propiedades del modelo. Se mencionan a continuación las más importantes:
 - En la opción **Building** se ingresa el nombre y la orientación del Edificio.
 - En **HeatBalanceAlgorithm** se selecciona el algoritmo que se utilizará para calcular la conducción a través de las paredes, en el presente caso se seleccionó Conduction Finite Difference. El método de las diferencias finitas es un método numérico para resolver las ecuaciones diferenciales que aparecen en el modelo energético del edificio, esto se realiza al reemplazar las derivadas por diferencias. Las ecuaciones 2.10 y 2.11 muestran con mayor detalle la utilización de este método.
 - En **Timestep** se selecciona el paso de tiempo para la simulación, en el presente estudio caso 1 paso por hora.

- En **Site:Location** se ingresan las características del lugar donde se localiza el edificio (Tabla 2.1).
- En **Schedule:Compact** se ingresan los horarios de las cargas térmicas y variables que tienen influencia en determinadas horas del día. Al no contar con cargas internas en este estudio, solamente se selecciona el horario para las infiltraciones que es de 24 horas.
- En **Material** se define todos los materiales que se utilizaran en el edificio con las propiedades como rugosidad, espesor, conductividad, densidad y calor específico, para el presente estudio estas se pueden visualizar en las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6.
- En **WindowMaterial:Glazing** se definen las propiedades del vidrio de las ventanas (Tabla 2.4).
- En **Construction** se crea los diferentes tipos de paredes, techos, ventanas o pisos que se requiera con los materiales definidos anteriormente.
- En **BuildingSurface:Detailed** si es necesario se puede editar la geometría de las superficies (Paredes, piso, techo), además se selecciona las condiciones de frontera y la exposición de las superficies al sol y viento.
- En **FenestrationSurface:Detailed** si es necesario se puede editar la geometría de las sub superficies (Ventanas y puertas) y sus condiciones de frontera.
- En **ZoneInfiltration:DesignFlowRate** se define el flujo de aire de infiltraciones en este caso 0,5 cambios de aire por hora (ACH), con su respectivo horario.
- Finalmente, en **Output:Variable** se selecciona las variables de salida, en este trabajo se selecciona como variables de salida, la temperatura de la zona, temperaturas superficiales y coeficientes de convección.
- Finalizada la edición, en el **EP-Launch** se escoge la opción **Wether File**, se selecciona el archivo climático de la ciudad de Quito y se simula el modelo.
- Una vez simulado el modelo, en **View Results** se selecciona la opción **Spreadsheets**, la cual provee de un archivo de Excel con todas las

variables de salida de simulación seleccionadas anteriormente en **Output:Variable**. Dichas variables de salida se utilizan para la posterior validación numérica con los resultados del modelo desarrollado en Matlab.

Los pasos mencionados anteriormente serán seguidos para la creación de los diferentes modelos de edificio que se utilizará tanto para la validación como para el análisis paramétrico.

3.3. COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO EN MATLAB.

3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DESARROLLADO EN MATLAB

El código realizado en MATLAB (**APÉNDICE C**) funciona de acuerdo al diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.1. En el diagrama de flujo se observa el algoritmo utilizado para resolver los sistemas de ecuaciones descritos en el capítulo 2, el cual se basa en el cálculo iterativo de los coeficientes de convección, temperaturas superficiales y temperatura de la zona hasta llegar a una convergencia.

La temperatura de la zona (Ecuación 2.6) es función de variables que involucran todos los componentes del modelo, por tal motivo el algoritmo se aplica simultáneamente para todos los componentes, obteniéndose la temperatura de la zona en cada hora.

Tabla 3.2. Nomenclatura utilizada para el diagrama de flujo (Figura 3.1.)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
EPW	Datos del archivo meteorológico (Temperatura del cielo, suelo, ambiente, precipitación, Velocidad del viento, intensidad de radiación de onda corta).
PG	Propiedades geométricas (Distancia entre nodos, dimensiones, espesor y área de los componentes).
PM	Propiedades de los materiales (Absortividad solar, conductividad térmica, densidad, calor específico, Difusividad térmica).
Toi	Temperatura inicial de la superficie interna de los componentes.
Toe	Temperatura inicial de la superficie externa de los componentes.
Toz	Temperatura inicial de la zona interna del modelo.
t	Tiempo inicial de la simulación.
T	Tiempo final de la simulación.
It	Numero de iteraciones inicial. (It=0)
IT	Número de iteraciones máxima.

QSO	Radiación solar de onda corta. (Ver 2.2.2.2.)
HR	Coeficientes de convección por radiación con el cielo, suelo y aire. (Ver 2.2.2.3.)
QLWR	Radiación externa de onda larga. (Ver 2.2.2.3.)
HI	Coeficientes de convección dentro de la vivienda. (Ver 2.2.2.2.1. y 2.2.2.2.2.)
HE	Coeficientes de convección fuera de la vivienda. (Ver 2.2.2.3.1.)
TN	Temperaturas nodales. (Ver 2.2.3.)
TIC	Temperatura superficial interna de los componentes. (Ver 2.2.2.)
TEC	Temperatura superficial externa de los componentes. (Ver 2.2.2.)
TZ	Temperatura de la zona interna del modelo. (Ver 2.2.1.)
ε	Tolerancia; valor aceptado para la diferencia entre el valor inicial y el calculado de las variables; $\varepsilon = 0.01$.

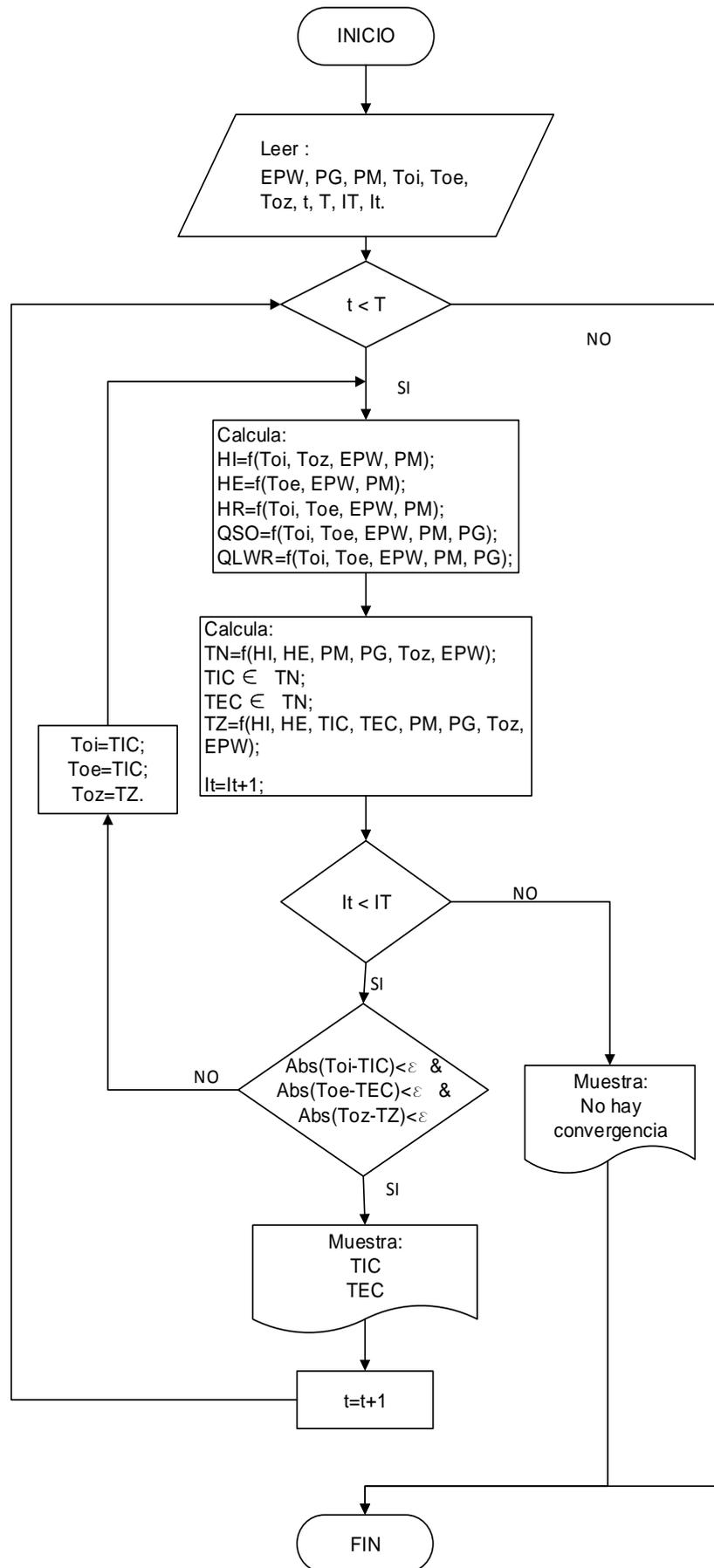


Figura 3.1. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en MATLAB

3.3.2. MODELOS DESARROLLADOS PARA LA VALIDACIÓN

Para la validación del modelo desarrollado en MATLAB se evaluará a dicho modelo bajo diferentes condiciones y características y se compararán los resultados con los modelos de simulación que se desarrollaron en EnergyPlus.

El proceso de validación se realizará en base a cuatro casos de comparación. Estos casos han sido escogidos con diferentes niveles de complejidad a fin de evaluar la incidencia de los diferentes parámetros sobre la precisión del modelo desarrollado. Estos casos se describen a continuación:

- Modelo A: Este modelo no tiene superficies acristaladas. Este modelo permitirá verificar los modelos de conducción y acumulación de energía de las paredes, obviando la ganancia energética solar a través de las ventanas. Las características de este caso se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características Modelo A

Características Modelo A						
Componente	Ubicación	Material	Dimensiones			
			Espesor [cm]	Largo [m]	Ancho [m]	Área [m]
Piso		Concreto	15	6	6	36
Techo		Concreto ligero	12	6	6	36
Puerta	Sur	Madera	3	2	1,5	3
Paredes	Norte	Ladrillo	15	6	2,5	15
	Sur					12
	Este					15
	Oeste					15
Ventanas	Norte	Vidrio	No tiene ventana			
	Sur		No tiene ventana			
	Este		No tiene ventana			
	Oeste		No tiene ventana			

- Modelo B: Este modelo consta de ventanas en las paredes Norte y Sur con un área igual al 20% del área de las paredes. Esta configuración permitirá evaluar el comportamiento del modelo de ventanas sobre todo en las pérdidas de calor a través de ellas (en las superficies norte y sur la ganancia energética solar es baja). Las características de este caso se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Características Modelo B

Características Modelo B						
Componente	Ubicación	Material	Dimensiones			
			Espesor [cm]	Largo [m]	Ancho [m]	Área [m]
Piso		Concreto	15	6	6	36
Techo		Concreto ligero	12	6	6	36
Puerta	Sur	Madera	3	2	1,5	3
Paredes	Norte	Ladrillo	15	6	2,5	10,5
	Sur					7,5
	Este					15
	Oeste					15
Ventanas	Norte	Vidrio	0,5	1,5	3	4,5
	Sur					No tiene ventana
	Este					No tiene ventana
	Oeste					No tiene ventana

- Modelo C: Este modelo consta de ventanas en las paredes Norte y Sur. En la pared Norte el área de ventanas es igual al 90% del área de la pared, mientras que en la pared Sur el área de ventanas es igual al 70% del área de la pared (un 20% de la superficie restante corresponde a la puerta). Este caso pretende evaluar el mismo concepto del caso B. Las características de este caso se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Características Modelo C

Características Modelo C						
Componente	Ubicación	Material	Dimensiones			
			Espesor [cm]	Largo [m]	Ancho [m]	Área [m]
Piso		Concreto	15	6	6	36
Techo		Concreto ligero	12	6	6	36
Puerta	Sur	Madera	3	2	1,5	3
Paredes	Norte	Ladrillo	15	6	2,5	1,5
	Sur					1,65
	Este					15
	Oeste					15
Ventanas	Norte	Vidrio	0,5	5,6	2,4	13,5
	Sur					10,35
	Este					No tiene ventana
	Oeste					No tiene ventana

- Modelo D: Este modelo consta de ventanas en las paredes Este y Oeste con un área igual al 50% del área de la pared. Este modelo permitirá evaluar el comportamiento del modelo cuando existen índices de

ganancia solar elevados. Las características de este caso se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características Modelo D (Tudela, 1982), (Monroy, 1995)

Características Modelo C						
Componente	Ubicación	Material	Dimensiones			
			Espesor [cm]	Largo [m]	Ancho [m]	Área [m]
Piso		Concreto	15	6	6	36
Techo		Concreto ligero	12	6	6	36
Puerta	Sur	Madera	3	2	1,5	3
Paredes	Norte	Ladrillo	15	6	2,5	15
	Sur					12
	Este					7,5
	Oeste					7,5
Ventanas	Norte	Vidrio	No tiene ventana			
	Sur		No tiene ventana			
	Este		0,005	4	1,875	7,5
	Oeste		0,005	4	1,875	7,5

3.3.3. COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN

Para la comparación de los resultados obtenidos del modelo desarrollado en Matlab con el modelo desarrollado en EnergyPlus se evaluó la temperatura de la zona interna del edificio, así como las temperaturas superficiales de los diferentes componentes, dicha comparación se la realizó calculando el promedio de los errores relativos entre las temperaturas horarias obtenidas en los modelos de Matlab y EnergyPlus. A continuación se muestran las gráficas de tendencia de la temperatura de la zona en los modelos de Matlab y EnergyPlus y temperatura ambiente exterior para las primeras 200 horas del año (una semana aproximadamente), y el error promedio de las temperaturas superficiales y temperatura de la zona entre los dos modelos para todo el año. Cabe recalcar que las simulaciones fueron realizadas para todo el año, las gráficas muestran solamente las primeras 200 horas por facilidad de visualización.

3.3.3.1. Resultados modelo A

Este modelo muestra un error promedio de 1,4% para la zona, lo que confirma la buena aproximación con el modelo de simulación. El error promedio máximo se lo encuentra en la temperatura superficial interna de la puerta y corresponde

a 3,9%. Además, se puede observar, para el caso de las paredes, que el error en la temperatura superficial externa es mayor que la interna. El error en la superficie externa del piso no aplica debido a que en los modelos de EnergyPlus y Matlab se considera la temperatura del suelo constante. La variación que se presenta entre los modelos de Matlab y EnergyPlus en las primeras horas de simulación se debe a que las temperaturas iniciales para iniciar las iteraciones en los dos modelos son diferentes, este fenómeno se presenta en todos los modelos llegando a ser despreciable debido a que sucede aproximadamente solo durante 5 horas y el análisis se realiza para todo el año (8760 horas). La comparación de la temperatura de la zona, así como los errores promedios de las superficies de la envolvente y de la zona se presentan en la Figuras 3.2 y en la Tabla 3.8, respectivamente.

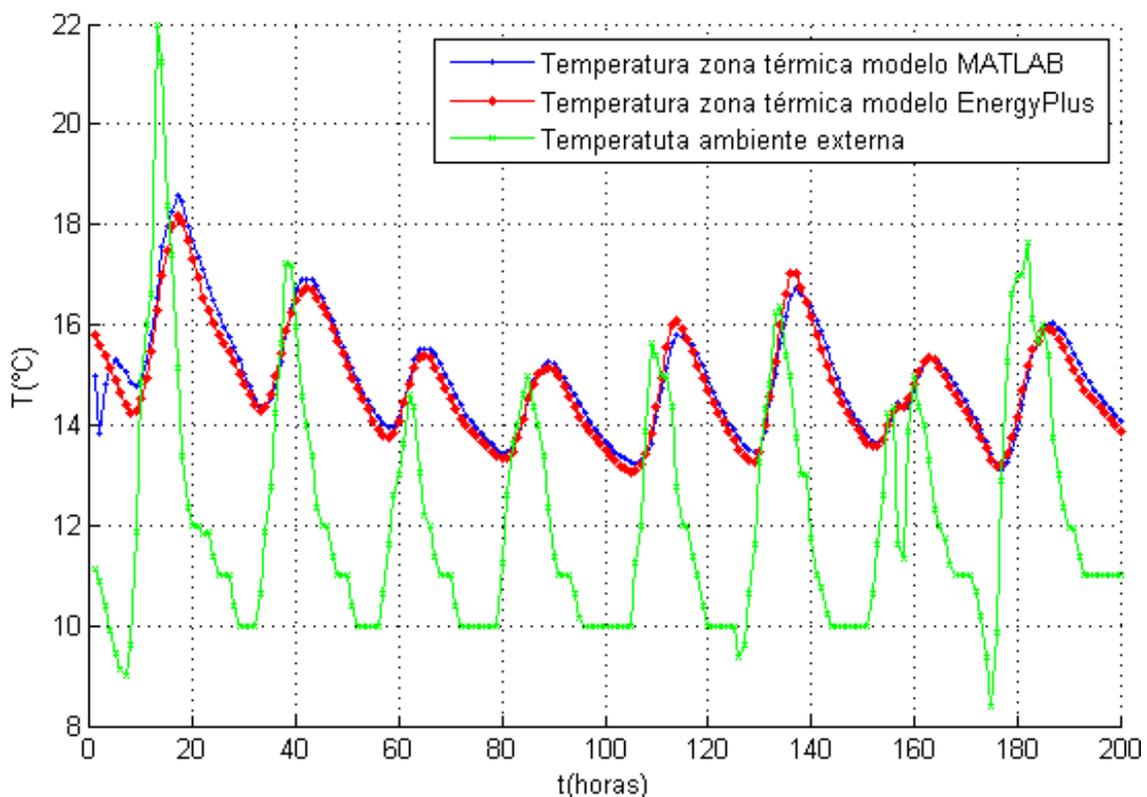


Figura 3.2. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo A

Tabla 3.7. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo A

Componente	Error Temperatura Superficial Interna (%)	Error Temperatura Superficial Externa (%)
Pared Norte	2.3	3.4

Pared Sur	2.4	3.2
Pared Este	2.6	3.6
Pared Oeste	2.3	3.4
Piso	3.3	N/A
Techo	4.4	3.6
Puerta	4.8	3.9
Zona Térmica	1.4	

3.3.3.2. Resultados modelo B

En este modelo, al igual que el modelo anterior, el error promedio de la temperatura de la zona se mantiene en un valor aproximado de 2.47%. Se presume que este incremento en el error promedio de la zona se debe al tratamiento inadecuado de las ganancias solares y las pérdidas a través de las paredes. Sin embargo, los errores se mantienen aún bajos. El máximo error promedio se da en las temperaturas superficiales de las ventanas con un valor de 6,97 % en la ventana sur. Al igual que en el Modelo A, se presenta un mayor error en la temperatura superficial externa que la interna de las paredes. La comparación de la temperatura de la zona, así como los errores promedios de las superficies de la envolvente y de la zona se presentan en la Figuras 3.3 y la Tabla 3.9, respectivamente.

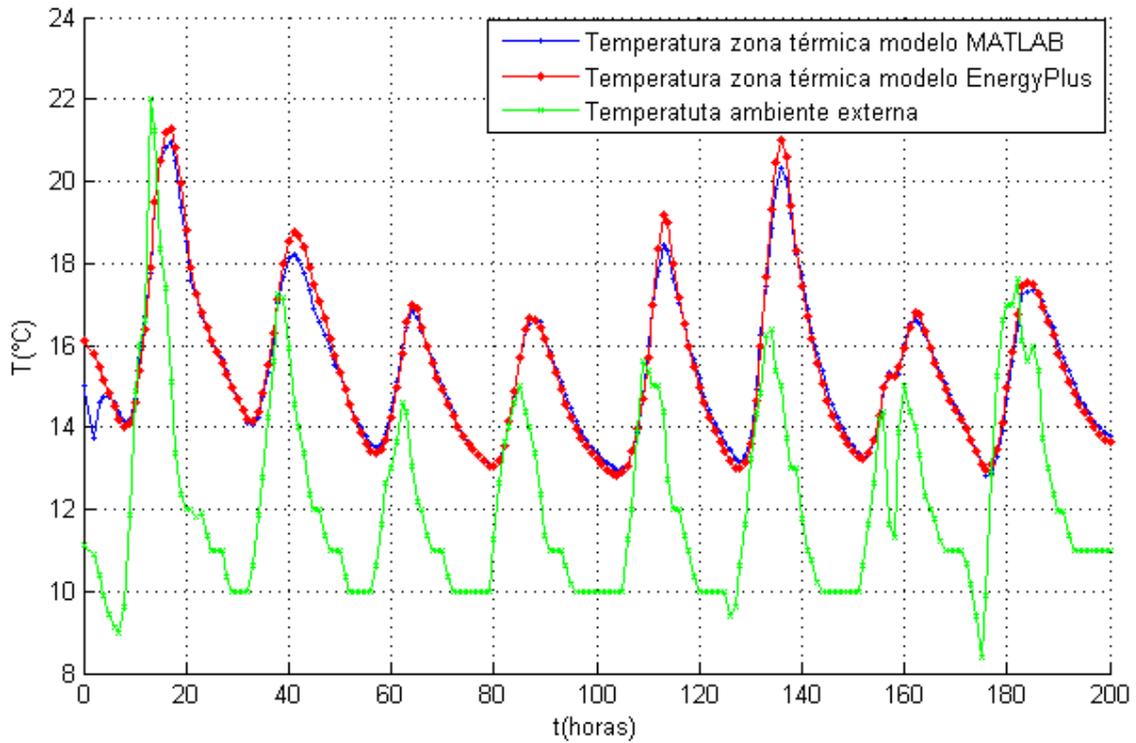


Figura 3.3. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo B

Tabla 3.8. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo B

Componente	Error Temperatura Superficial Interna (%)	Error Temperatura Superficial Externa (%)
Pared Norte	4.31	5.38
Pared Sur	4.58	5.13
Pared Este	3.90	5.52
Pared Oeste	4.02	6.23
Piso	5.04	N/A
Techo	4.14	4.79
Puerta	5.32	4.70
Ventana Norte	6.80	6.23
Ventana Sur	6.97	6.34
Zona Térmica	2.47	

3.3.3.3. Resultados modelo C

La comparativa en este modelo confirma la presunción del tratamiento inapropiado de la ganancia solar y las pérdidas a través de las ventanas. Debido a que en los dos últimos modelos la orientación favorece las pérdidas de energía sobre las ganancias solares, se estima que esta parte del modelo es la más imprecisa. El error promedio de la zona aumenta hasta un valor de 3,34%, que se corresponde con el incremento del área de las ventanas Norte y Sur. El mayor error promedio se da en la temperatura superficial interna de la puerta con un valor de 6,46 %. A diferencia de los Modelos A y B, en las paredes se presenta un mayor error en la temperatura superficial interna que la externa. La comparación de la temperatura de la zona, así como los errores promedios de las superficies de la envolvente y de la zona se presentan en la Figuras 3.4 y la Tabla 3.10, respectivamente.

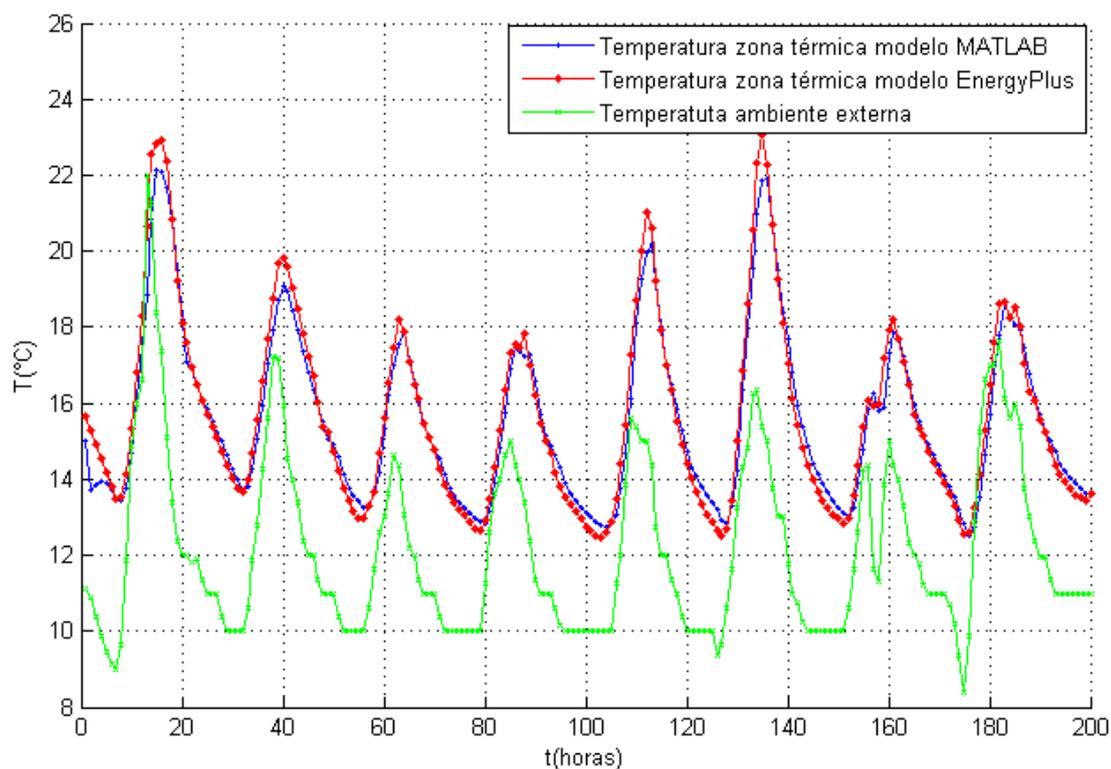


Figura 3.4. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo C

Tabla 3.9. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo C

Componente	Error Temperatura Superficial Interna (%)	Error Temperatura Superficial Externa (%)
Pared Norte	5.34	4.77

Pared Sur	5.04	4.71
Pared Este	5.19	4.65
Pared Oeste	5.31	6.10
Piso	4.83	N/A
Techo	6.43	6.04
Puerta	6.46	3.96
Ventana Norte	4.76	7.44
Ventana Sur	4.73	7.49
Zona Térmica	3.34	

3.3.3.4. Resultados modelo D

Este modelo muestra un error promedio de la zona de 2,5%, menor que el anterior modelo, sin embargo los errores en las temperaturas superficiales internas aumenta alcanzando valores promedios de 8,34% en el techo y 7,25% en la puerta. A diferencia del Modelo C, en las paredes se presenta un mayor error en la temperatura superficial externa que la interna. La comparación de la temperatura de la zona, así como los errores promedios de las superficies de la envolvente y de la zona se presentan en la Figuras 3.5 y la Tabla 3.11, respectivamente.

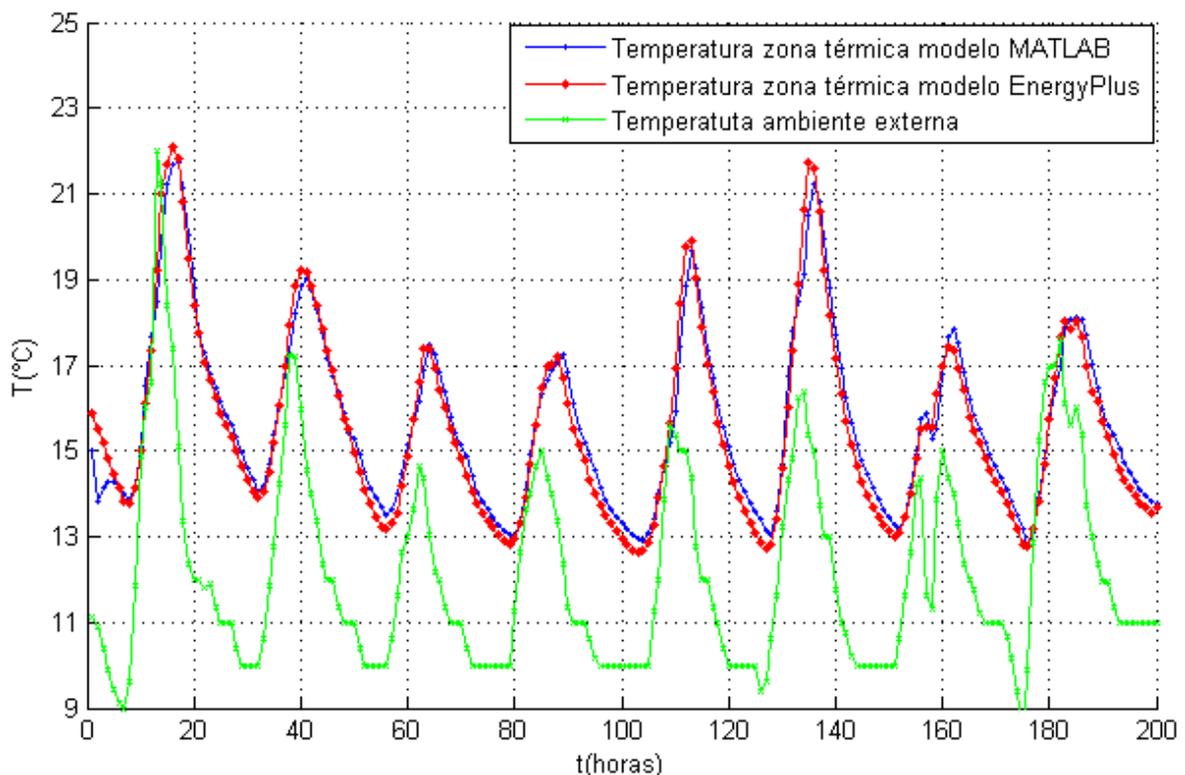


Figura 3.5. Comportamiento de la Temperatura de la Zona Térmica Modelo D

Tabla 3.10. Error promedio Temperaturas Superficiales y Zona Térmica Modelo D

Componente	Error Temperatura Superficial Interna (%)	Error Temperatura Superficial Externa (%)
Pared Norte	4.29	4.87
Pared Sur	4.10	4.68
Pared Este	5.14	4.29
Pared Oeste	5.05	5.85
Piso	4.85	N/A
Techo	8.34	5.70
Puerta	7.25	4.21
Ventana Norte	3.79	6.76
Ventana Sur	3.81	6.77
Zona Térmica	2.50	

3.3.3.5. Análisis de Validación

Al realizar la comparación de las cuatro variaciones de modelos se puede observar que en ningún caso el error promedio supera el 10%, siendo en el Modelo D, la temperatura interna del techo la que presenta el mayor error con un valor de 8,34%. Es importante observar que mientras más porcentaje de acristalamiento se tiene, el error en la comparación de los modelos aumenta y de manera especial cuando estos acristalamientos están en las direcciones Este y Oeste. Este incremento del error al aumentar el porcentaje de acristalamiento se debe principalmente a que no se considera la radiación reflejada por las ventanas, además que el modelo en Matlab utiliza diferentes correlaciones para el cálculo de los coeficientes de convección internos respecto a los que utiliza en EnergyPlus. Otro aspecto relevante para el incremento del error es que el Modelo de Matlab desprecia el intercambio radiactivo entre las superficies internas de la zona térmica. Para la zona térmica interior el error no es demasiado elevado, llegando a un valor máximo de 3,34% en el Modelo C. Así mismo, la tendencia en las comparaciones son bastante aceptables, por lo que se considera que el modelo desarrollado da una buena aproximación de lo que se puede obtener en programas computacionales como EnergyPlus. Este modelo será utilizado en futuras investigaciones en donde se requieran una gran cantidad de simulaciones (optimizaciones, estudios paramétricos), en donde un programa como EnergyPlus es prohibitivo a nivel de costo computacional.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO PARAMÉTRICO

El presente capítulo se centra en el estudio de la variación de los parámetros escogidos. Cada parámetro será sometido a una variación dentro del rango que fue establecido en el Capítulo 2 y será evaluada su influencia en el comportamiento de la temperatura de la zona interna del edificio.

4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ESCOGIDOS PARA EL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Los parámetros a estudiar de acuerdo a lo establecido en el punto 2.1.3 del capítulo 2 son:

Tabla 4.1. Parámetros estudiados

Parámetros	Variación del parámetro
Material de Paredes	Ladrillo
	Adobe

	Bloque
Material de Techo	Teja + Gypsum
	Zinc + Playwood
	Zinc
	Concreto ligero
Infiltraciones	0 ACH
	1 ACH
	2 ACH
	3 ACH
Orientación de la vivienda	0°
	30°
	60°
	90°
Porcentaje de acristalamiento	
Ventanas	Variación del parámetro
Norte	0% - 100% / $\Delta=20\%$
Sur	0% - 100% / $\Delta=20\%$
Este	0% - 100% / $\Delta=20\%$
Oeste	0% - 100% / $\Delta=20\%$
Norte-Sur	0% - 100% / $\Delta=20\%$
Este-Oeste	0% - 100% / $\Delta=20\%$

4.2. ESTUDIO PARAMÉTRICO.

Se realizó un primer estudio paramétrico a partir del caso base, variando cada parámetro según se estableció en el punto 2.1.1 del Capítulo 2, de este estudio los resultados se presentan en gráficas de frecuencia de distribución de temperatura en las cuales se puede apreciar las horas que se mantiene la zona interna del edificio a determinada temperatura en el año estudiado.

En dichas gráficas los resultados del análisis paramétrico no tienen una buena apreciación, pues se puede observar que la inercia térmica del techo y paredes influyen en alto porcentaje sobre el comportamiento de la temperatura de la zona interna del edificio, no permitiendo observar la influencia de los parámetros restantes. Por lo que se procederá a realizar un nuevo análisis paramétrico para el cual se hará la suposición de un techo Adiabático. Además se reducirá el rango de variación del porcentaje de ventanas para poder observar los resultados con mayor claridad.

Los resultados de este estudio se pueden apreciar en el **APÉNDICE 2**.

4.2.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Durante el estudio paramétrico, ciertas variables se mantendrán fijas mientras otras cambian. En la Tabla 4.2 se tabulan los valores de los parámetros que se mantendrán fijos en este estudio. Estos valores se consideran representativos de la vivienda ecuatoriana.

Tabla 4.2 Parámetros fijos de los componentes (Tudela, 1982),(Monroy, 1995), (Jaramillo, 2012)

PARÁMETROS FIJOS							
Componente	Material	Propiedades			Dimensiones		
		Densidad [kg/m ³]	Conductividad [W/m°C]	Calor específico [J/kgK]	Espesor [cm]	Largo [m]	Ancho [m]
Piso	Concreto	2400	1,6	1050	15	6	6
Puerta	Madera	600	0,14	1210	5	2	1,5
Paredes	Ladrillo	1800	0,73	920	15	6	2,5
Techo	Concreto ligero	1850	0,72	1000	12	6	6

Los resultados del estudio paramétrico se muestran en dos diferentes gráficas y en una tabla, una primera gráfica de frecuencia de distribución de temperatura en las cual se puede apreciar las horas que se mantiene la zona interna del edificio a determinada temperatura en el año estudiado y una segunda grafica Temperatura vs. Tiempo donde se observa la variación de la temperatura de la zona térmica durante las horas correspondientes a la semana más caliente del año estudiado, la tabla muestra el número de horas en que la zona térmica se encuentra dentro y fuera del rango de temperatura de confort durante el año, que se considera entre los 17°C y 27°C (ASHRAE, *Handbook—Fundamentals*, 2009) dado que estos valores se establecen para sedentarismo, independientemente si la zona térmica esta acondicionada o no, también se muestra el porcentaje de horas en que la zona se mantiene dentro del rango de confort en el año.

4.2.1.1. Materiales paredes

Se realizó un estudio paramétrico variando los materiales de las paredes escogidos anteriormente (ladrillo, adobe, bloque). En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran las frecuencias de las temperaturas alcanzadas en la zona a lo largo

del año, así como las temperaturas alcanzadas en la zona para un intervalo de 120 horas.

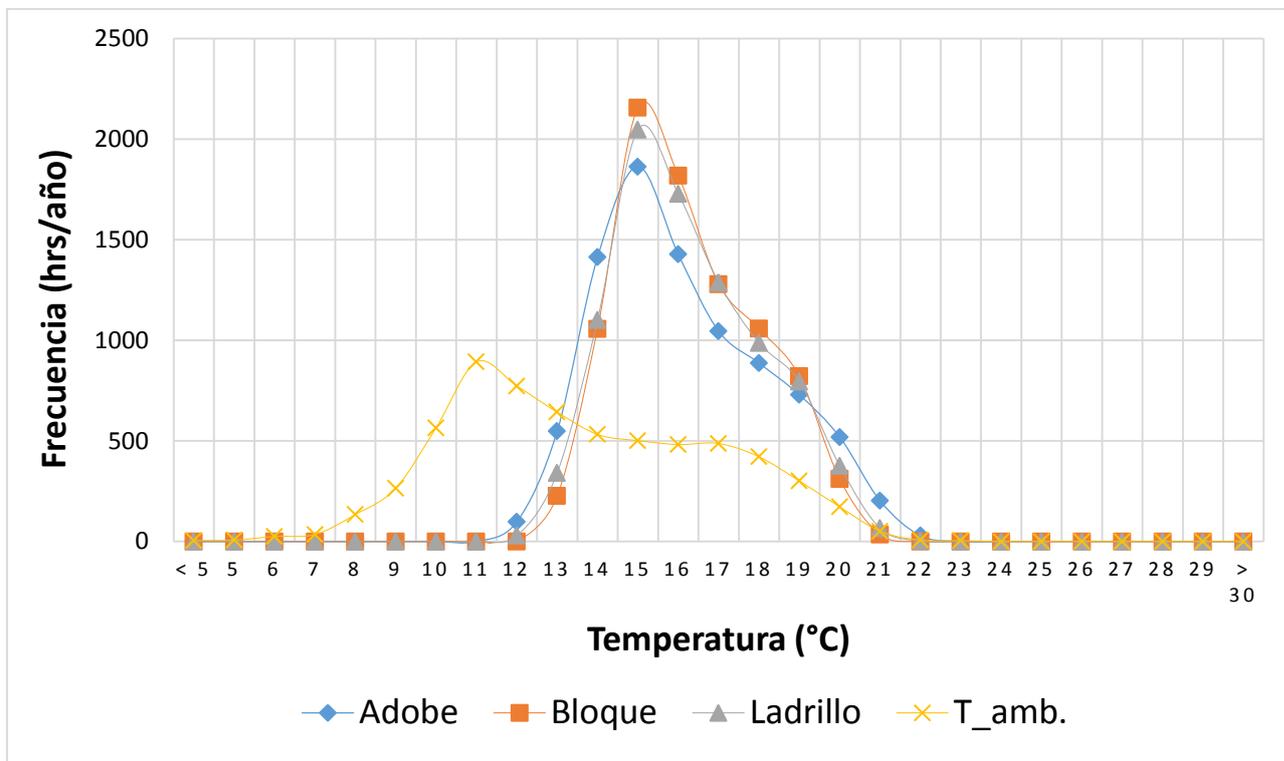


Figura 4.1 Distribución de temperaturas con diferentes materiales de paredes

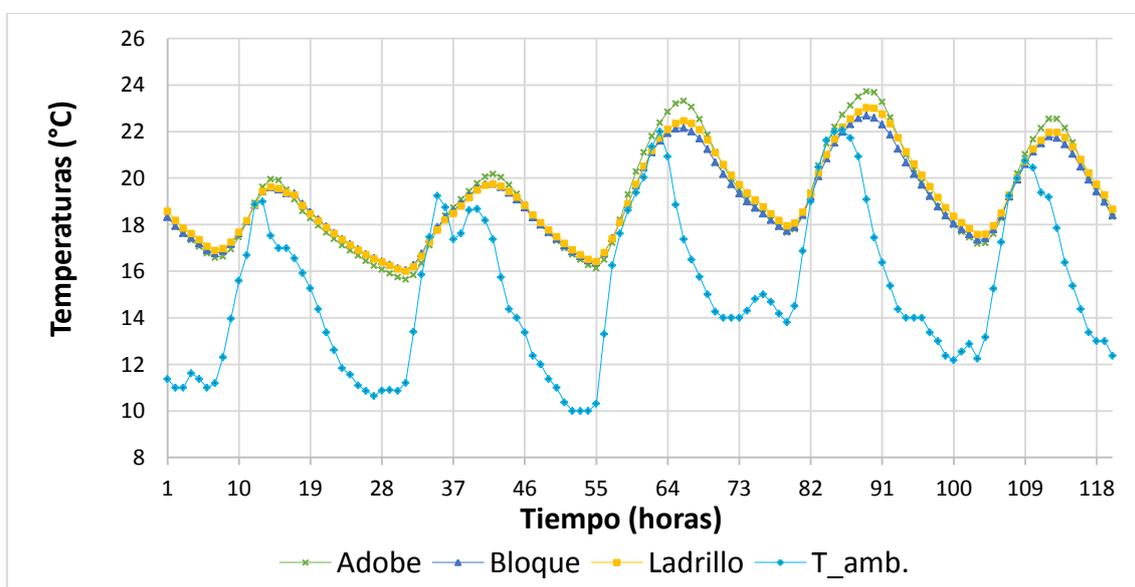


Figura 4.2. Temperatura de la zona con diferentes materiales de paredes

Tabla 4.3. Horas de confort térmico con diferentes materiales de paredes

	Adobe	Bloque	Ladrillo
Horas dentro del confort térmico(h)	4838	5321	5242

Horas fuera del confort térmico(h)	3922	3439	3518
Porcentaje de horas dentro del confort térmico (%)	55,23	60,74	59,84

Los resultados obtenidos muestran la influencia del material usado en la envolvente sobre la temperatura interior. De acuerdo a estándares internacionales, el rango de confort considera variables como tasa metabólica, vestimenta (nivel de aislación), temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y humedad relativa, sin embargo, en este estudio se considera únicamente datos de temperatura del aire en un rango entre 17°C y 27°C usados para contrastar los resultados, dado que este rango se considera de temperatura de confort para condiciones de sedentarismo (ASHRAE, *Handbook—Fundamentals*, 2009). En la Figura 4.1 y Tabla 4.3 se observa que cuando se usa paredes de adobe en la envolvente existe una alta frecuencia de temperaturas de malestar. Esto es visible al notar que existe una agrupación mayor de horas en el rango de temperaturas entre 12°C y 20°C. En los casos de paredes de ladrillo y especialmente de bloque, las curvas de frecuencia se desplazan hacia la derecha mejorando las condiciones de confort térmico. Para estos casos, la mayor agrupación de horas está en el rango de 14°C y 22°C. Asimismo se puede observar que el bloque agrupa las horas con temperaturas más frías y el adobe las más calientes, mientras que el ladrillo tiene un comportamiento promedio entre estos otros dos materiales.

En la Figura 4.2 se muestra el comportamiento de la temperatura de la zona en un rango de tiempo de 118 horas. Se puede observar que las condiciones más estables se obtienen con el uso del ladrillo, con el que se obtiene una menor variación entre sus temperaturas máximas y mínimas en el día y la noche, respectivamente. En el caso del adobe se observa que posee la menor inercia térmica, lo que provoca temperaturas extremas con picos muy pronunciados en el día y valles por la noche. Hay que tomar en cuenta que el espesor de las paredes juega un papel importante, en este caso se considera el mismo espesor en los tres tipos de espesor.

4.2.1.2. Materiales del techo

De la misma forma, se procedió a variar los materiales del techo para investigar su influencia sobre la temperatura de la zona. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran las frecuencias de las temperaturas alcanzadas en la zona a lo largo del año, así como las temperaturas alcanzadas en la zona para un intervalo de 120 horas.

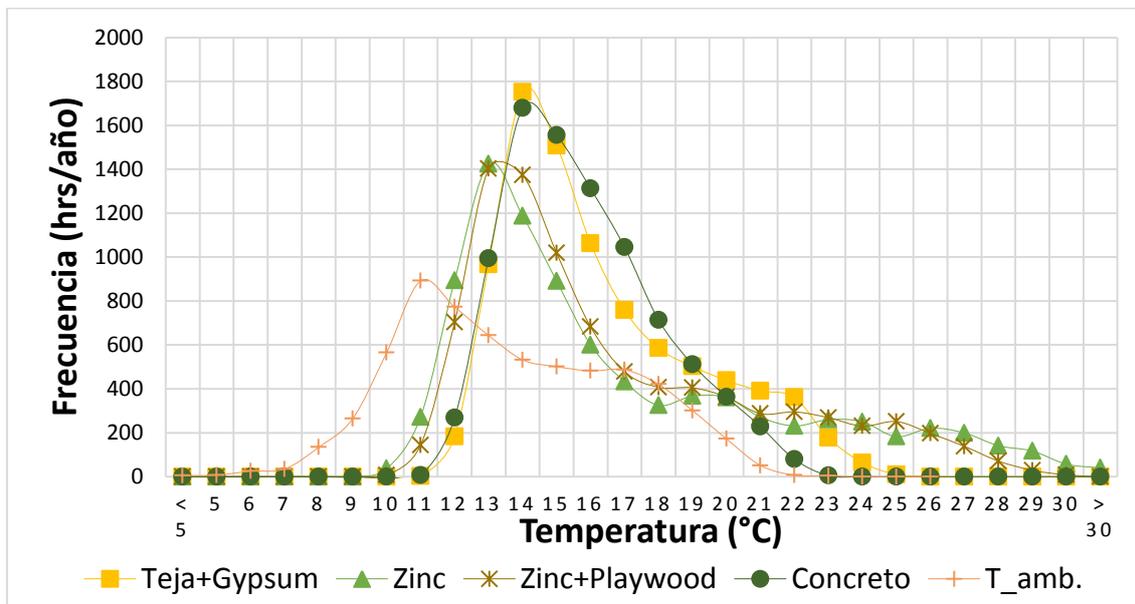


Figura 4.3. Distribución de temperaturas con diferentes materiales del techo

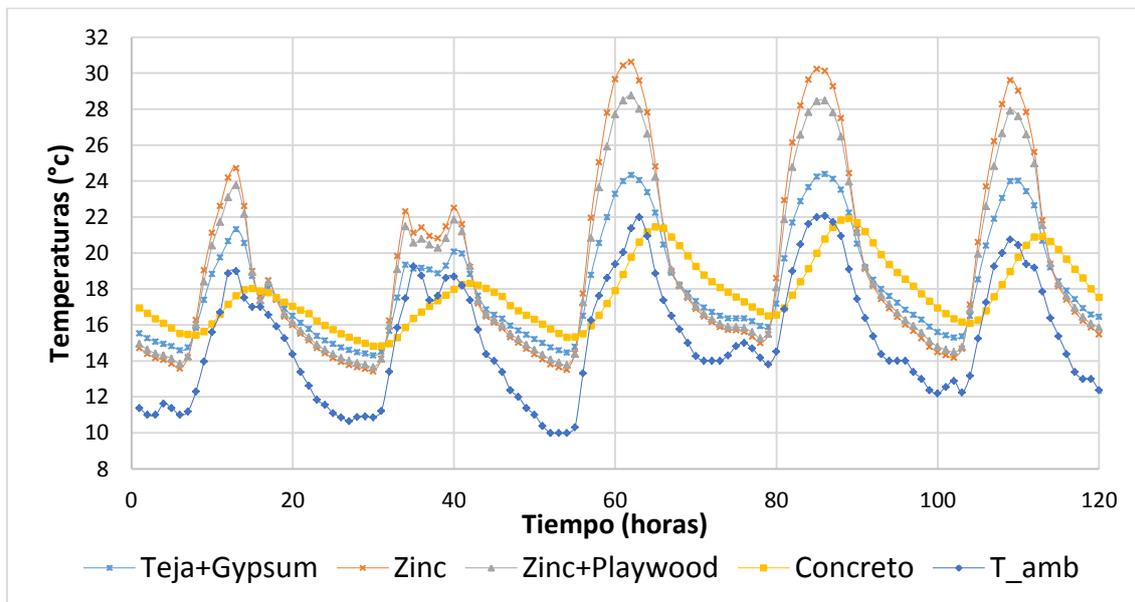


Figura 4.4. Temperatura de la zona con diferentes materiales del techo

Tabla 4.4. Horas de confort térmico con diferentes materiales del techo

	Teja + Gypsum	Zinc	Zinc + Plywood	Hormigón
Horas dentro del confort térmico(h)	3286	2900	3182	2945
Horas fuera del confort térmico(h)	5474	5860	5578	5815
Porcentaje de horas dentro del confort térmico (%)	37,51	33,10	36,32	33,61

Los resultados obtenidos en los cuatro casos muestran que el techo con materiales de zinc y zinc más playwood tienen un comportamiento similar, mostrando condiciones altas de malestar. Para los dos casos la mayor agrupación de horas están en un rango de temperaturas entre 12°C y 16°C, además, es interesante observar el comportamiento que presentan cuando la curva se aproxima a la derecha donde abarca una cantidad considerable de horas a mayores temperaturas desde 20°C hasta 30°C. Las bajas temperaturas se deben al mal aislamiento que presentan estos materiales, lo que implica que durante las noches o días fríos el calor acumulado dentro de la vivienda se disipe por el techo. Asimismo, durante los momentos del día con alta radiación la temperatura del techo es elevada, actuando como un radiador hacia el interior de la vivienda, incrementando la temperatura de la zona muy por encima de la temperatura ambiente. Para los casos de techos con concreto y teja más gypsum se observa que la frecuencia de temperaturas en la zona de confort es mayor, donde la mayor agrupación de horas está en el rango de 13°C a 22°C.

Los resultados obtenidos en la temperatura de la zona son similares para los techos de zinc y zinc más playwood, en donde se obtienen las temperaturas más frías y más calientes. Por el contrario, el techo de teja más gypsum brinda una temperatura más estable y el techo de concreto aún más, además de existir la menor diferencia entre las temperaturas máximas en el día y mínimas en la noche. Con el techo de concreto se logra además un retraso de la temperatura máxima de la zona con respecto a la ambiente y una temperatura más caliente durante la noche, esto debido a la capacidad que tiene el concreto para almacenar energía (masa térmica).

4.2.1.3. Orientación de la construcción

La influencia de la orientación se estudió a través de la variación de la misma en el modelo. Se realizaron saltos de 30° desde una orientación de 0° donde la fachada principal se orienta hacia el Sur. En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran las frecuencias de las temperaturas alcanzadas en la zona a lo largo del año, así como las temperaturas alcanzadas en la zona para un intervalo de 70 horas.

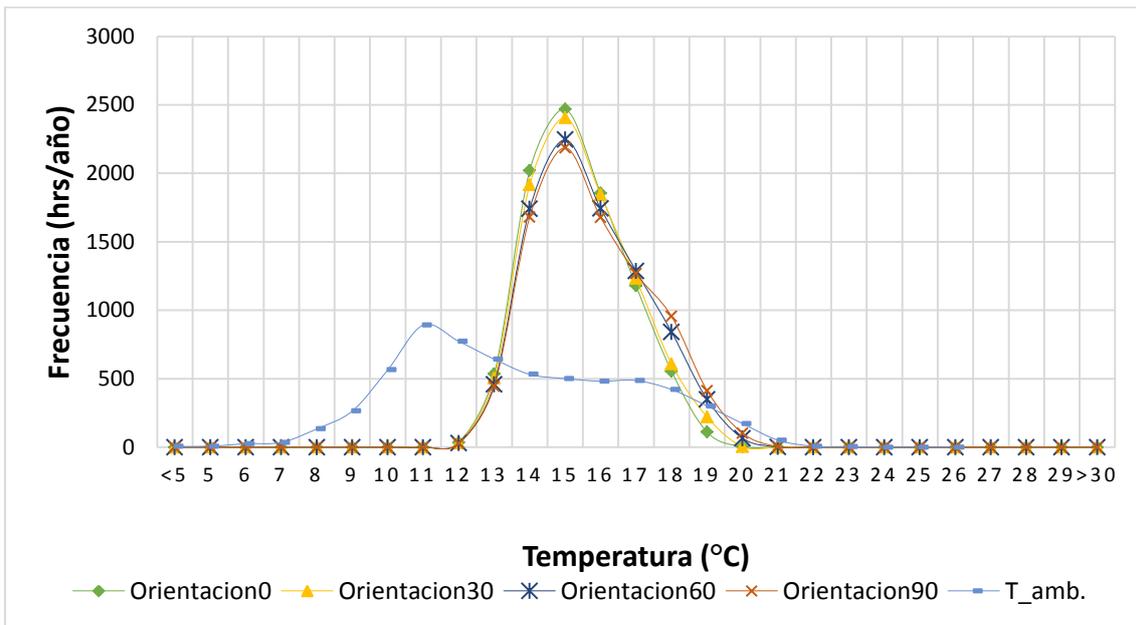


Figura 4.5. Distribución de temperaturas con diferentes orientaciones de la vivienda

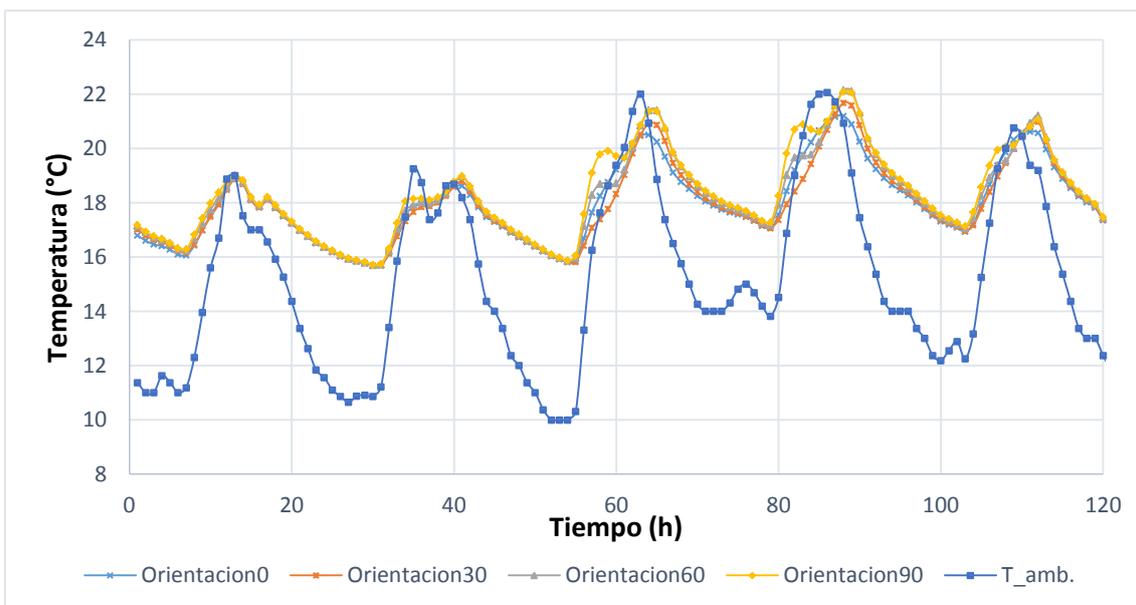


Figura 4.6. Temperatura de la zona al con diferentes orientaciones de la vivienda

Tabla 4.5. Horas de confort térmico con diferentes orientaciones de la vivienda

	Orientacion0	Orientacion30	Orientacion60	Orientacion90
Horas dentro del confort térmico(h)	2052	2236	2625	2802
Horas fuera del confort térmico(h)	6708	6524	6135	5958
Porcentaje de horas dentro del confort térmico (%)	23,42	25,53	29,96	31,99

Los resultados obtenidos en los cuatro casos simulados demuestran que la temperatura interior varía de acuerdo a la orientación de la construcción. Es importante recordar que la Orientación 0 corresponde cuando la fachada principal se orienta hacia el Sur y Orientación 90 corresponde cuando la fachada principal se orienta hacia el Este. Aunque las curvas prácticamente presentan la misma tendencia se puede observar claramente que para los casos de Orientación 60 y 90 las curvas se desplazan hacia la derecha, es decir la frecuencia de horas a mayor temperatura aumentan. Las cuatro curvas muestran la mayor agrupación de horas entre las temperaturas de 14°C y 19°C. Sin embargo, al ubicar ventanas dirigidas al Este y Oeste es decir orientación 90 la frecuencia de horas dentro del rango de confort aumenta, demostrando que para este caso en particular la orientación más favorable es la que coloca sus fachadas acristaladas en las caras Este-Oeste. Este resultado se contrapone a aquellos presentados en el estudio llevado a cabo por Miño et al. (2013), donde la orientación más favorable es la que coloca sus fachadas acristaladas en las caras Norte-Sur. Esto confirma la influencia de la insolación en el comportamiento térmico de la vivienda. El estudio de Miño et al. se hizo para un ambiente más cálido (Urcuquí), en donde el malestar térmico se da por una alta frecuencia de altas temperaturas. En este caso la mejor estrategia para permanecer en la zona de confort es protegerse de la insolación (menor ganancia térmica) por lo que es más recomendable colocar las ventanas en la dirección norte-sur (menor insolación directa). Por otra parte, para el presente estudio, las temperaturas exteriores son bajas (clima andino) lo que conlleva a adoptar estrategias para maximizar la ganancia energética exterior, siendo más recomendable una orientación este-oeste.

El comportamiento de la temperatura de la zona se muestra en la Figura 4.6. Se observa una mayor temperatura de la zona en la orientación 90, esto se

traduce en una mayor ganancia solar debida a la radiación durante el día, en la figura se puede apreciar además un retardo de la temperatura máxima de la zona con respecto a la ambiente, debido a energía acumulada durante el día.

4.2.1.4. Infiltraciones

La influencia de las infiltraciones se estudió a través de la variación de las mismas en el modelo. Se realizaron saltos de 1 ACH (Cambios de Aire por Hora) desde cero cambios de aire por hora. En las Figuras 4.7 y 4.8 se muestran las frecuencias de las temperaturas alcanzadas en la zona a lo largo del año, así como las temperaturas alcanzadas en la zona para un intervalo de 70 horas

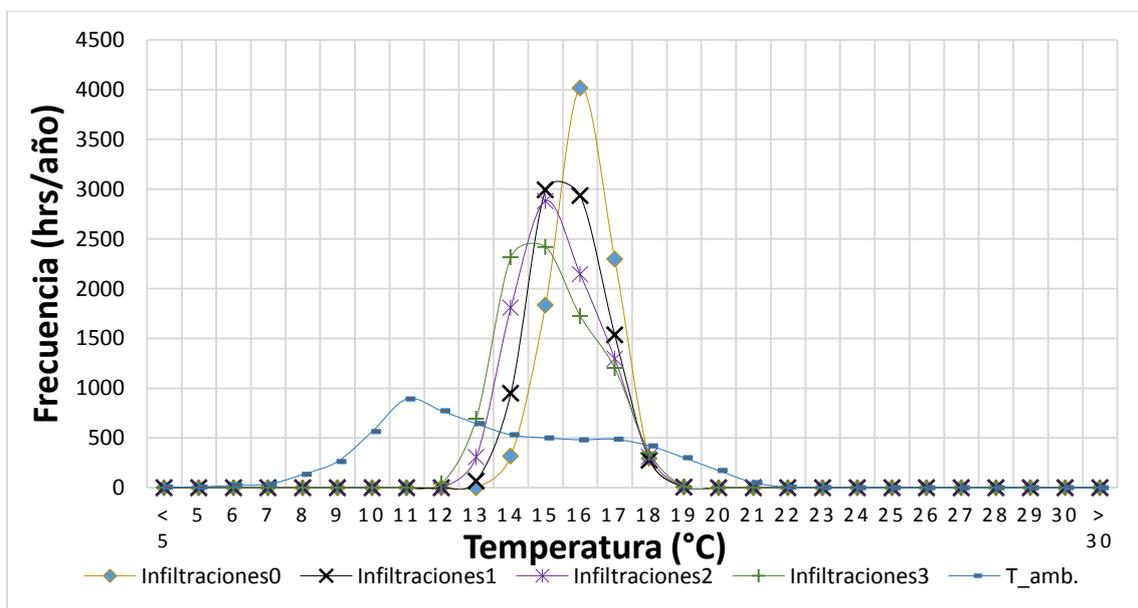


Figura 4.7. Distribución de temperaturas para diferentes tasas de infiltración

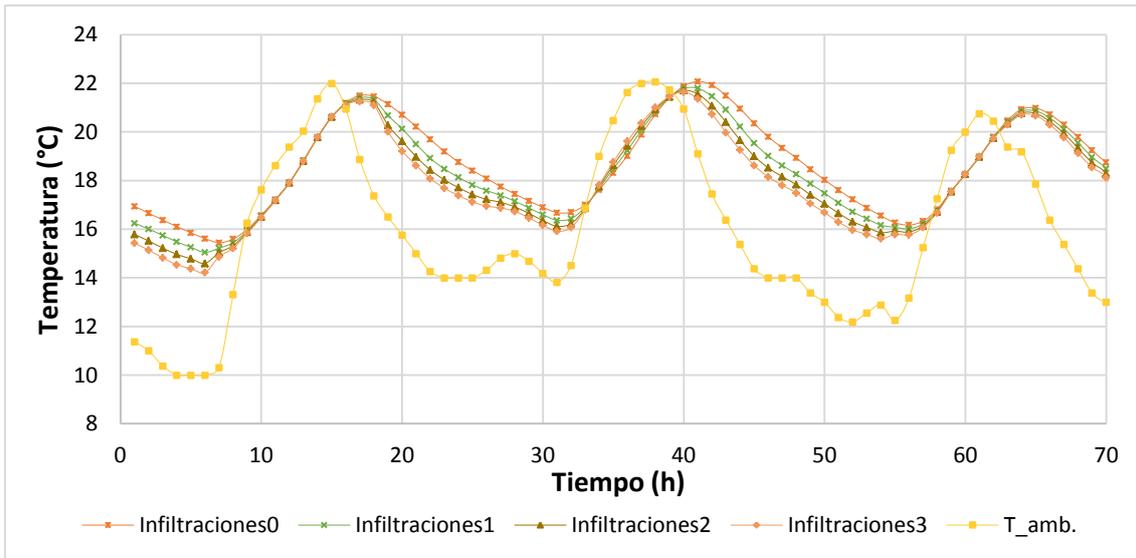


Figura 4.8. Temperatura de la zona para diferentes tasas de infiltración

Tabla 4.6. Horas de confort térmico para diferentes tasas de infiltración

	Infiltraciones0	Infiltraciones1	Infiltraciones2	Infiltraciones3
Horas dentro del confort térmico(h)	2594	1819	1615	1565
Horas fuera del confort térmico(h)	6166	6941	7145	7195
Porcentaje de horas dentro del confort térmico (%)	29,61	20,76	18,44	17,87

Los resultados obtenidos muestran que la temperatura de la zona se torna más fría conforme la infiltración de aire aumenta. Como se observa en la Figura 4.7 para el caso de infiltraciones de 0 ACH (En la práctica sería imposible tener infiltraciones de 0 ACH, siempre existen infiltraciones no deseadas además no habría renovación de aire) la mayor agrupación de horas se encuentra en el rango de temperaturas entre 14°C y 18°C, mientras que para Infiltraciones de 3 ACH la mayor agrupación de horas se presenta para temperaturas entre 11°C y 18°C, para infiltraciones intermedias entre estos dos valores analizados se puede ver que las curvas siguen la misma tendencia.

El comportamiento de la temperatura de la zona en la Figura 4.8 muestra temperaturas más bajas durante la noche a medida que la tasa infiltraciones es mayor. En el día se tiene una temperatura de la zona similar para las diferentes tasas de infiltraciones. Se debe tener en consideración que el aire, debido a las

infiltraciones, ingresa desde el exterior a una temperatura ambiente, por tal motivo en la noche cuando la temperatura ambiente es más baja influye en mayor proporción sobre el ambiente interior disminuyendo la temperatura de la zona, mientras que durante el día la temperatura de la zona se aproxima a la temperatura ambiente, por lo cual no existe una mayor diferencia entre la temperatura de la zona alcanzada con las distintas tasas de infiltraciones

4.2.1.5. Porcentaje de acristalamiento

La influencia del porcentaje de acristalamiento se estudió a través de la variación de las mismas en el modelo. Desde las Figuras 4.9 hasta 4.14 se muestran las frecuencias de las temperaturas alcanzadas en la zona a lo largo del año y en las Figura 4.15 y 4.16 las temperaturas alcanzadas en la zona para un intervalo de 70 horas.

Tabla 4.7. Horas de confort térmico al variar las ventanas norte y sur

	NorteSur0	NorteSur20	NorteSur40	NorteSur60	NorteSur80	NorteSur100
Horas dentro del confort térmico(h)	282	2052	3338	4253	3949	4353
Horas fuera del confort térmico(h)	8478	6708	5422	4507	4811	4407
Porcentaje de horas dentro del confort térmico (%)	3,22	23,42	38,11	48,55	45,08	49,69

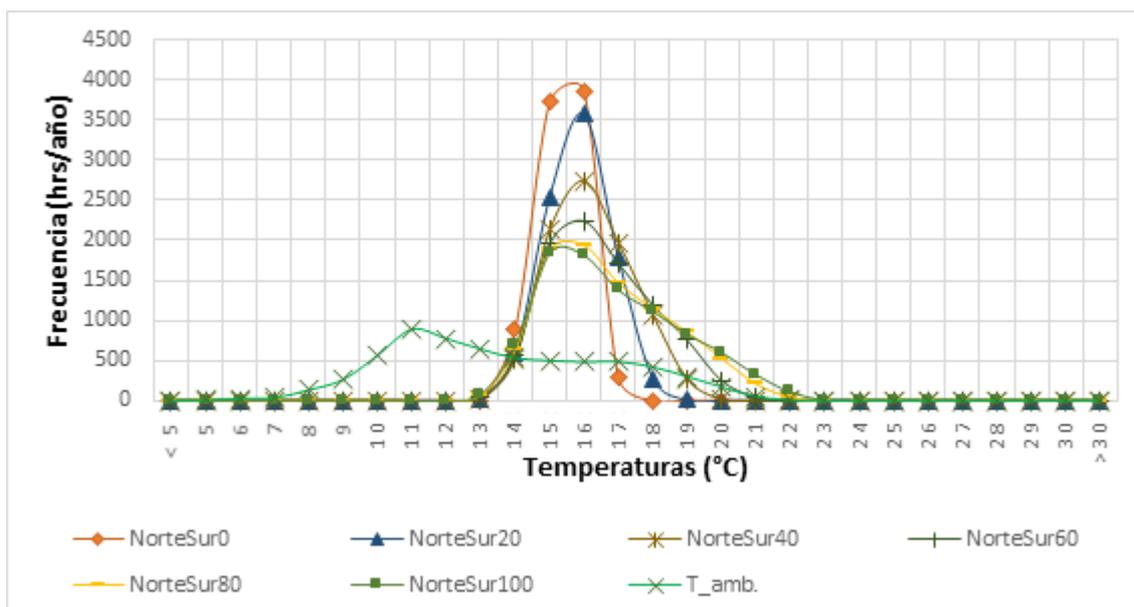


Figura 4.9. Distribución de temperaturas al variar las ventanas norte y sur

Tabla 4.8. Horas de confort térmico al variar las ventanas este y oeste

	EsteOeste0	EsteOeste20	EsteOeste40	EsteOeste60	EsteOeste80	EsteOeste100
Horas dentro del confort térmico(h)	282	2674	4026	4893	4588	5050
Horas fuera del confort térmico(h)	8478	6086	4734	3867	4172	3710
Porcentaje de horas dentro del confort térmico (%)	3,22	30,53	45,96	55,86	52,37	57,65

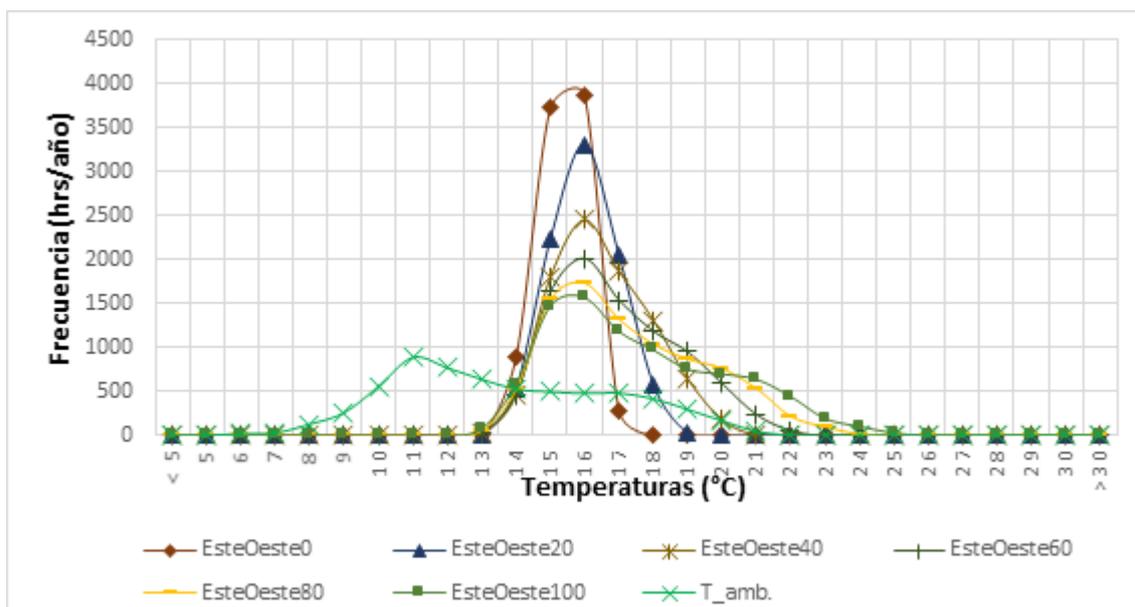


Figura 4.10. Distribución de temperaturas al variar las ventanas este y oeste

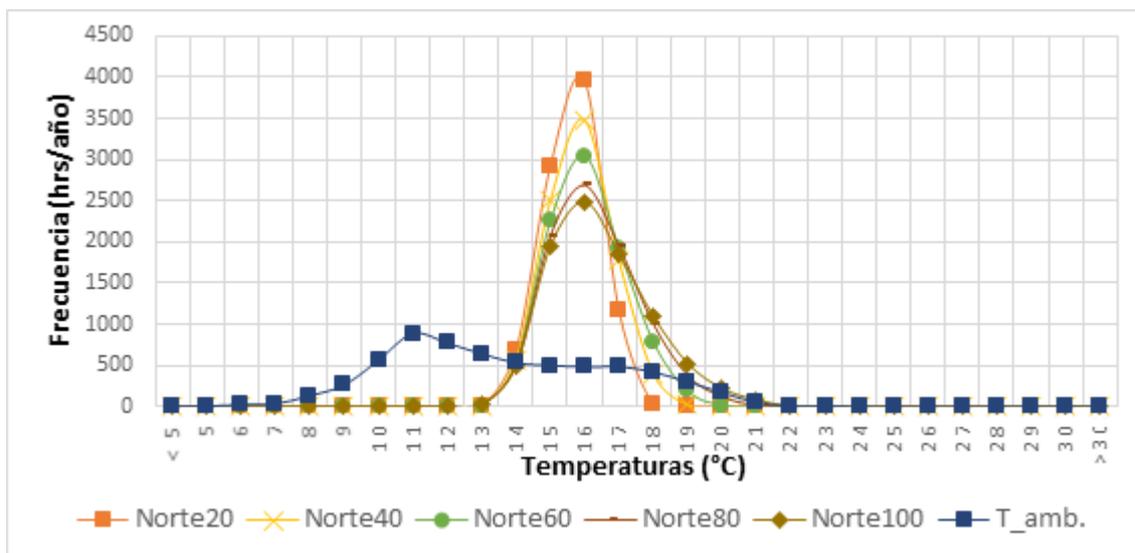


Figura 4.11. Distribución de temperaturas al variar la ventana norte

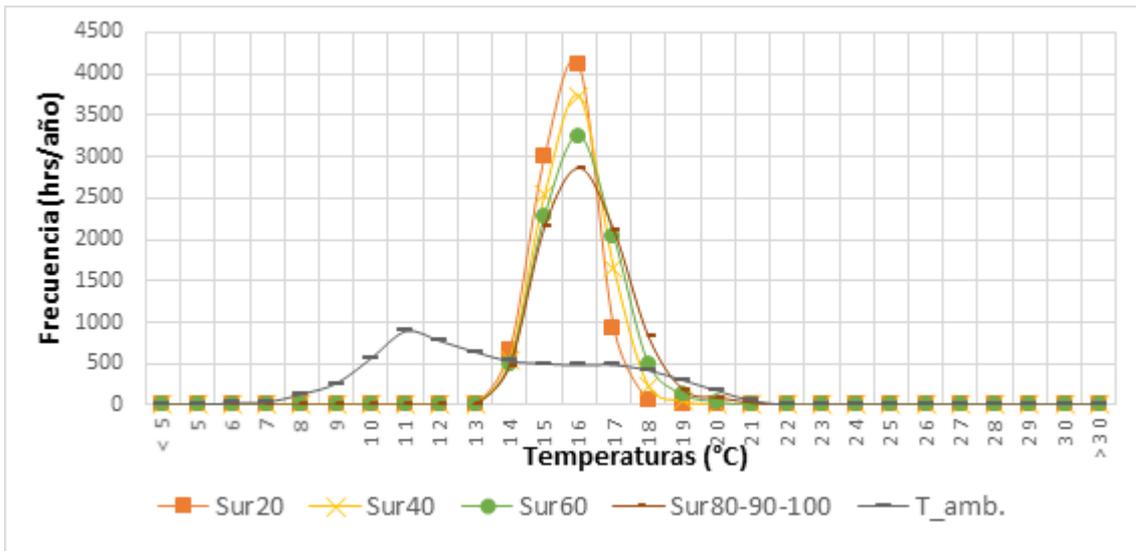


Figura 4.12. Distribución de temperaturas al variar la ventana sur

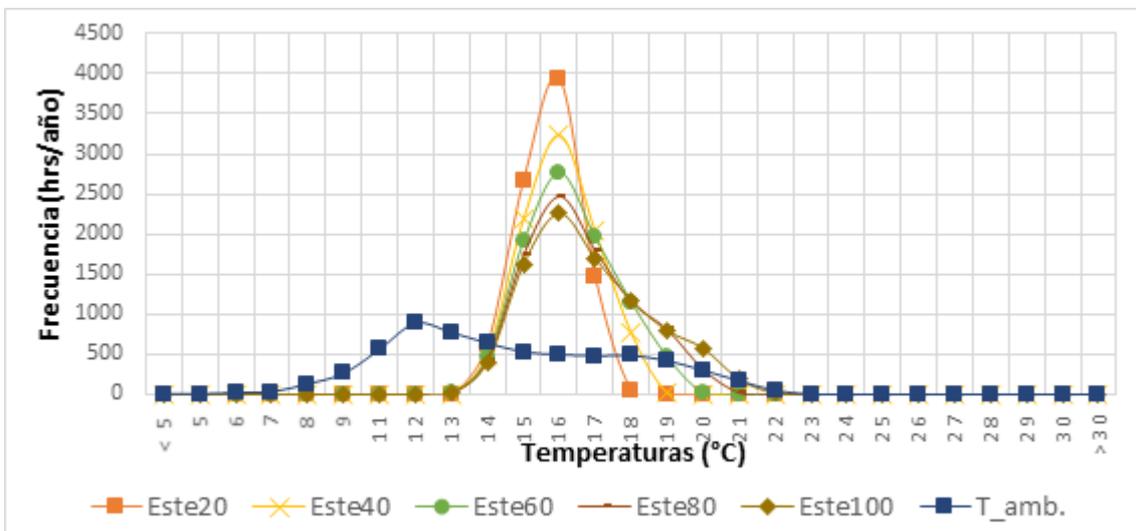


Figura 4.13. . Distribución de temperaturas al variar la ventana este

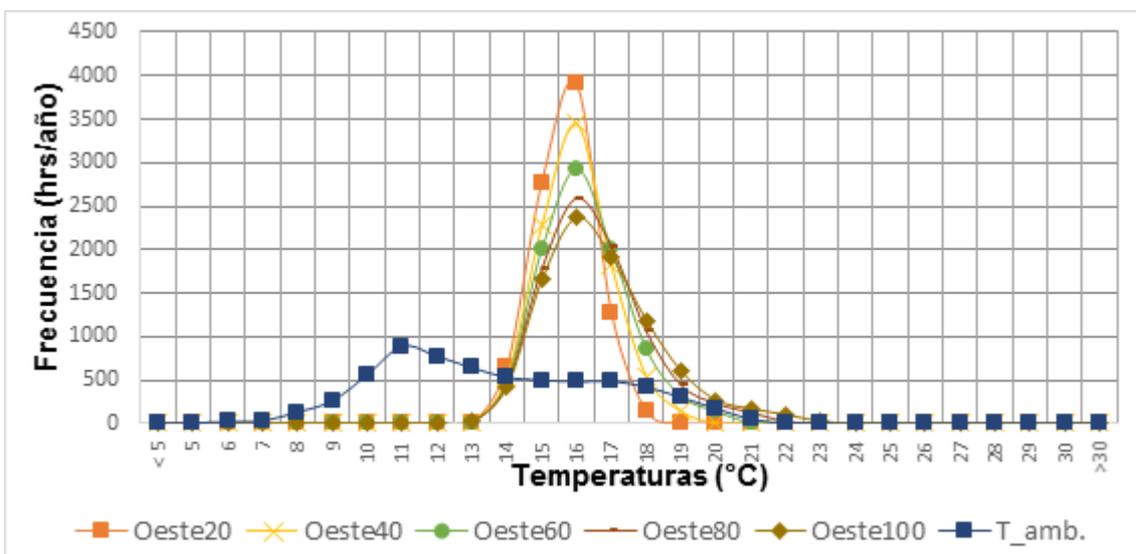


Figura 4.14. Distribución de temperaturas al variar la ventana oeste

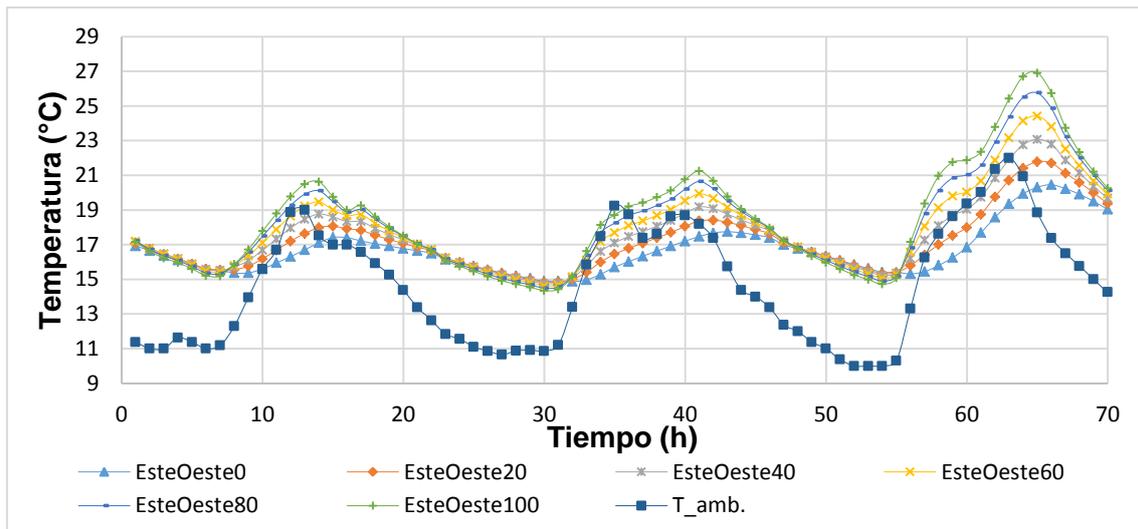


Figura 4.15. Temperatura de la zona al variar el porcentaje de ventanas este-oeste

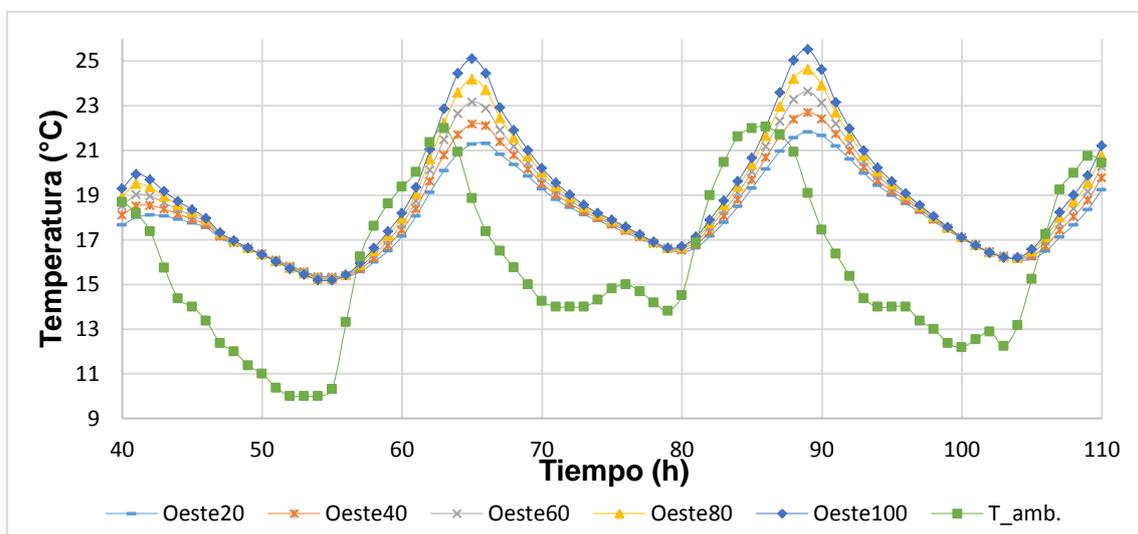


Figura 4.16. Temperatura de la zona al variar el porcentaje de ventanas norte sur

En todos los casos estudiados se puede observar que conforme aumenta el porcentaje de acristalamiento, las curvas de frecuencia se desplazan hacia la derecha, aumentando la acumulación de horas a temperaturas más cálidas. Este hecho se puede confirmar en la Figura 4.10, donde se tiene un porcentaje de acristalamiento de 50% con ventanas en la dirección Este-Oeste. Esto significa que existe un mayor porcentaje de radiación directa incidente que ingresa al sistema a través de las ventanas. Como consecuencia la frecuencia de temperaturas cercanas al rango de confort térmico aumentó (rango de 15°C a 24°C). Una característica particular que se presenta en todos los casos en las gráficas de distribución es que las curvas después de pasar por su punto máximo se extienden en mayor proporción hacia la derecha aumentando las

horas a temperaturas calientes, comparándolas con las mismas curvas cuando estas se extienden al lado izquierdo, esta expansión es mucho más apreciable conforme aumenta el porcentaje de acristalamiento, esto es debido a que el efecto de acristalamiento es más influyente durante las horas cálidas, es decir durante el día, lo que se puede verificar en las Figuras 4.15 y 4.16 donde la temperatura de la zona presenta mayor variación durante el día. Para porcentajes de acristalamiento intermedios, entre los valores mínimos y máximos analizados, se puede ver que las curvas siguen la misma tendencia, es decir que su comportamiento es proporcional al porcentaje de acristalamiento.

El comportamiento de la temperatura de la zona mostrado en la Figura 4.15, muestra que a mayor porcentaje de acristalamiento mayor es la temperatura de la zona durante el día y durante la noche a mayor acristalamiento menor la temperatura de la zona. Además, se observa las mayores temperaturas de la zona cuando el acristalamiento se ubica en la dirección Este-Oeste, obteniéndose temperaturas de hasta 27°C, mientras que en la dirección Norte-Sur las mayores temperaturas llegan a ser de hasta 25,5°C, esto indica una mayor ganancia solar cuando el acristalamiento se ubica en la dirección Este-Oeste.

4.2.2. RELEVANCIA DE LOS PARÁMETROS

En el presente apartado se presenta la priorización de los parámetros, esta priorización se la realiza de manera cualitativa al analizar los resultados del estudio paramétrico. Se toma en consideración el comportamiento de la zona térmica y la cantidad de horas en las cuales la zona térmica se encuentra dentro del rango de confort, el objetivo es determinar tendencias que servirán como línea base para el desarrollo de posteriores investigaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos el parámetro que mayormente influencia en el comportamiento térmico de la zona es el material tanto en paredes y techos. Dentro de estos dos parámetros el material del techo juega un papel más relevante, debido a que la superficie del techo al encontrarse mayor tiempo expuesta a la insolación directa puede acumular energía para después debido a la inercia térmica del mismo libere esta energía a la zona térmica de la

edificación, este fenómeno se pudo apreciar en el primer estudio paramétrico realizado (**APENDICE 2**) donde la inercia térmica del techo no permite visualizar la influencia de los demás parámetros, por lo que se decidió realizar los posteriores estudios paramétricos considerando el techo adiabático.

El porcentaje de acristalamiento también influye en gran medida en el comportamiento térmico de la zona debido a las ganancias solares que ingresan a la misma, obteniéndose una gran cantidad de horas dentro del rango de confort para altos porcentajes de acristalamiento. En este estudio en particular se observó la mayor variación en el comportamiento de la zona, pues como podemos ver en la Tabla 4.9 el porcentaje de horas en el año a temperaturas dentro del rango de confort térmico para ventanas en la dirección Este-Oeste presenta la mayor variación en este porcentaje teniendo un 3% para cuando no se tiene ventanas hasta 57% cuando se considera que las paredes este y oeste son solo ventanas. Es importante recordar que este comportamiento puede cambiar para otras climatologías.

El aumento de la tasa de infiltraciones tiene una menor influencia que los parámetros anteriores sobre la zona térmica y este es más apreciable solo durante la noche.

Por último respecto a la orientación, como se puede ver en la Tabla 4.6 la orientación 90° con ventanas solo en la dirección Este-Oeste presenta el mayor porcentaje de horas a temperaturas de confort (32%), lo que muestra una vez más la influencia mayoritaria de las ventanas, pues en esta orientación las ventanas reciben la insolación directa.

De acuerdo a estas consideraciones y análisis se puede dar un orden de relevancia a los parámetros estudiados, como se muestra a continuación:

1. Materiales de techos
2. Materiales de paredes
3. Porcentaje de acristalamiento
4. Tasa de infiltraciones
5. Orientación de la construcción

Se debe tener en consideración que este orden puede cambiar especialmente entre materialidad de techo y paredes y porcentaje de ventanas, pues depende en gran medida de la climatología utilizada en el análisis y con el uso de sistemas de climatización o la consideración de cargas internas se puede obtener diferentes resultados.

CAPÍTULO V

5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con el fin de cumplir con los objetivos planteados, en este trabajo se presentó una revisión bibliográfica sobre modelos energéticos globales de edificaciones, así como modelos particularizados de los principales

componentes como paredes, techo y ventanas. Se encontró que estos modelos pueden ser físicos, basados en datos y combinados donde la principal ventaja de utilizar modelos físicos es su facilidad para simular diferentes variaciones de modelos con diferentes parámetros, por lo que es posible simular el comportamiento en el caso de diferentes materiales, ubicación geográfica, orientaciones, posición, número y porcentaje de ventanas en diferentes períodos del año.

- Se desarrolló un modelo térmico simplificado de un edificio, que luego fue programado en Matlab. Este modelo permitió la simulación del comportamiento transitorio de un edificio de una sola zona térmica, a partir de las características geométricas del mismo, de las renovaciones de aire, ubicación, orientación y condiciones climáticas externas. El programa desarrollado es una herramienta útil para futuras investigaciones, en las cuales se realizarán estudios paramétricos y optimizaciones.
- Se validó numéricamente el modelo desarrollado en Matlab a través de una comparación con un modelo análogo en EnergyPlus, dicha validación muestra que el modelo desarrollado da una buena aproximación de lo que se puede obtener en programas computacionales como EnergyPlus, dado que los errores en la zona térmica son bajos no superando el 3,5%. Se usaron cuatro variaciones de dicho modelo. Las variaciones utilizadas fueron de distinta complejidad a fin de localizar la fuente de errores en el modelo desarrollado. El mayor error relativo promedio para la temperatura de la zona térmica encontrado en las comparaciones fue del 3,34%, que corresponde a un modelo con 90% de superficie de ventanas en la pared Norte y 70% de superficie de ventanas en la pared Sur. Se encontró que el error relativo de la temperatura de la zona aumenta conforme aumenta el tamaño de las ventanas, este incremento del error se debe principalmente a que no se considera la radiación reflejada por las ventanas, además que el modelo en Matlab utiliza diferentes correlaciones para el cálculo de los coeficientes de convección internos

respecto a los que utiliza en EnergyPlus. Otro aspecto relevante para el incremento del error es que el Modelo de Matlab desprecia el intercambio radiactivo entre las superficies internas de la zona térmica.

- El estudio paramétrico se inició con la materialidad de paredes donde los resultados de los tres casos estudiados permiten concluir que el material que ofrece las mejores condiciones de habitabilidad para la climatología de Quito es el ladrillo, pues este material permiten un comportamiento más estable de la zona térmica evitando picos y valles de temperatura, esto debido a su inercia térmica. Pero también se pudo apreciar que el comportamiento del bloque no difiere en gran magnitud del ladrillo.
- En el análisis realizado de los materiales del techo el Concreto permite las mejores condiciones de habitabilidad, a diferencia del techo de Zinc y de su combinación con Playwood, los cuales debido a alta conductividad térmica, bajo calor específico y espesor del Zinc permite temperaturas extremas de la zona térmica, temperaturas elevadas en el día y bajas durante la noche. El mejor material recomendado para techos bajo las condiciones climáticas estudiadas es el concreto, pues este debido a su inercia térmica permite estabilizar la temperatura de la zona, almacenando energía durante el día y cediéndola durante la noche para permitir temperaturas de confort.
- El análisis paramétrico de la orientación de la construcción permiten concluir que incrementa en el confort térmico al ubicar el edificio orientado en dirección Este-Oeste (Rotado 90°), este comportamiento especial es debido a que el modelo estudiado presenta ventanas solo en la dirección Norte-Sur, y al rotarlo 90° la incidencia del sol esta sobre las ventanas, que se traduce a mayores ganancias solares, incrementando la temperatura de la zona térmica, ubicándolo dentro de los rangos de confort térmico. La influencia de la orientación del edificio es observable prácticamente solo durante el día cuando existe radiación solar, pues solamente la radiación solar directa es la que influye al rotar la construcción.

- En el análisis realizado para las infiltraciones de aire los resultados del estudio paramétrico permite concluir que particularmente para el modelo las mejores condiciones de habitabilidad se tiene para infiltraciones de 0 ACH, pues se encontró que a mayor cantidad de infiltraciones incrementan las horas a temperaturas de la zona por debajo del rango de confort térmico, este comportamiento particular se debe a que la zona térmica es fría, donde su temperatura el mayor porcentaje de tiempo está por debajo de 17°C, este fenómeno es mucho más apreciable en las noches, donde al aumentar las infiltraciones el aire frío del exterior ingresa a la zona haciendo que su temperatura disminuya, mientras que en el día no existe mayor diferencia pues las condiciones del aire del exterior son similares a las de la zona térmica.
- El estudio paramétrico para las ventanas los resultados de las simulaciones para este parámetro permiten concluir que porcentajes de acristalamiento entre el 40% y 60% permiten las mejores condiciones de habitabilidad, pues a mayores porcentajes la temperatura de la zona tiende a elevarse sobre los rangos de confort. Además los resultados permitieron determinar que las mayores temperaturas de la zona corresponde a los acristalamientos en la dirección Este-Oeste, siendo lógico este comportamiento debido a que en esta dirección la zona recibe la mayor influencia de la radiación solar directa, dentro de estas direcciones la dirección Oeste es la que mayormente influye, pues se observó que al disponer de ventanas solo en esta dirección se registró las mayores temperaturas, esto se puede explicar que debido a la ubicación de la ventana, la zona que se calienta durante la mañana por ganancias convectivas y pasado el mediodía se calienta aún más porque comienza a incidir radiación solar directa sobre la zona. Respecto a las mínimas temperaturas que se registran durante las noches, se encuentra que a mayor porcentaje de acristalamiento menor es la temperatura de la zona, lo que muestra que durante las noches se pierde calor por las ventanas, pero a pesar de esto se puede concluir que la influencia de los acristalamientos sobre el comportamiento

térmico de la zona es mucho más relevante durante las horas del día, debido a la presencia de la radiación solar.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio paramétrico las tendencias indican que los parámetros a ser tomados mayormente para el diseño de edificaciones confortables térmicamente son la materialidad de los elementos de construcción y el porcentaje y ubicación de las ventanas para la climatología estudiada.
- Para los posteriores trabajos del programa de investigación que se pretende realizar se recomienda la realización de un estudio similar, bajo diferentes condiciones ambientales y considerando cargas internas procedentes de equipos, luces y personas, pues de esta manera en un ambiente más cálido se podrá observar un comportamiento diferente de la zona térmica al variar los parámetros utilizados en este estudio.
- De la misma manera para los siguientes trabajos a realizarse se recomienda desarrollar un estudio más a detalle de la influencia de la radiación que ingresa por las ventanas e incide sobre los componentes del modelo, así mismo incluir en un futuro estudio ventanas con dos capas, que eviten las pérdidas durante la noche, pero que no interfieran mucho con las ganancias en el día.

5.2. BIBLIOGRAFÍA

AHMAD, N. I. A.-H. and A. I. (1987). SHORT COMMUNICATION Effect of window parameters on indoor thermal environment of buildings N. I. AL-HAMDANI and A. I. AHMAD, 4(I).

Ali, M. M., & Armstrong, P. J. (2008). Overview of Sustainable Design Factors in High-Rise

Buildings Overview of Sustainable Design Factors in High-Rise Buildings.

- ARQHYS. (n.d.). Retrieved June 2, 2016, from <http://www.arqhys.com/arquitectura/infiltracion-aire.html>
- ASHRAE. (2009). *ASHRAE® handbook* (Vol. 30329).
- ATECYR. (2008). Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. Madrid.
- Bălan, R., Cooper, J., Chao, K.-M., Stan, S., & Donca, R. (2011). Parameter identification and model based predictive control of temperature inside a house. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 748–758. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.023>
- Boji, M., Kostić, N., & Cvetković, D. (2012). INFLUENCE OF SOLAR DISTRIBUTION MODELS TO ENERGYPLUS PREDICTION, 837–844.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- Cengel, Y. a. (1997). Transferencia De Calor Y Masa, 53(9), 900. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Chan, a. L. S. (2011). Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect. *Building and Environment*, 46(12), 2434–2441. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.038>
- Chen, Y., Zhou, J., Spitler, J. D., & Engineering, S. (2005). A method to verify calculation of transient heat conduction through multilayer building constructions, (1), 159–166.
- CLIMATOLOGÍA. - METRO DE QUITO. (n.d.). Retrieved September 3, 2015, from <http://www.portaltecnico.metrodequito.gob.ec/tecmetro.php?c=1350>
- Dorota Chwieduk, D.Sc., P. D. M. S. (2014). Energy Balance of a Building with Regard to Solar Radiation Exposure. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-410514-0.00006-2>
- Ehrt, D., Carl, M., Kittel, T., Müller, M., & Seeber, W. (1994). High-performance glass for the deep ultraviolet range. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 177, 405–419. [http://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)90555-X](http://doi.org/10.1016/0022-3093(94)90555-X)
- Ethiopian_Standard_Agency. (2003). ISO 15099 (2003). *Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices—Detailed Calculations, 15099*. [http://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00712-7](http://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00712-7)
- Ferrara, M., Virgone, J., Fabrizio, E., Kuznik, F., & Filippi, M. (2014). Modelling Zero Energy Buildings: Parametric Study for the Technical Optimization. *Energy Procedia*, 62, 200–209. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.381>
- Francisco, A., Rey, J., & Gomez, E. V. (2006). Eficiencia energética en edificios . Certificación y auditorías energéticas, (31).
- García, N. O. (1994). South American climatology. *Quaternary International*, 21(93), 7–27. [http://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90018-3](http://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90018-3)
- Groth, C. C., & Lokmanhekim, M. (1969). Shadow - A New Technique for the Calculation of Shadow Shapes and Areas by Digital Computer. *Second Hawaii International Conference on System Sciences*, (January 22-24), 100–128.
- INEC. (2013). Contenido. *ENCUESTA DE EDIFICACIONES, 2013*.
- INEN. (2009). EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES. REQUISITOS. *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 506:2009, 2506*(Primera Edición), 16.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (n.d.). Retrieved September 3, 2015, from

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>

- JARAMILLO, A. S. (2012). Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones, 191.
- Kalz, D. E. (2014). Thermal Comfort and Energy-Efficient Cooling of Nonresidential Buildings.
- Larsen, S. F., Lesino, G., & Aires, C. B. (2001). Modelo térmico del programa simedif de simulacion de edificios, 9, 15–23.
- Lee, J. W., Jung, H. J., Park, J. Y., Lee, J. B., & Yoon, Y. (2013). Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable Energy*, 50, 522–531. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029>
- Liu, X., Chen, Y., Ge, H., Fazio, P., & Chen, G. (2015). Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Energy and Buildings*, 93, 259–268. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.016>
- Lu, T., Lü, X., & Kibert, C. (2015). A hybrid numerical-neural-network model for building simulation: A case study for the simulation of unheated and uncooled indoor temperature. *Energy and Buildings*, 86, 723–734. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.024>
- Lu, T., Lü, X., & Viljanen, M. (2015). A New Method for Modeling Energy Performance in Buildings. *Energy Procedia*, 75, 1825–1831. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.154>
- Lu, X. (2002). Modelling of heat and moisture transfer in buildings I . Model program, 34, 1033–1043.
- Lu, X., Clements-Croome, D., & Viljanen, M. (2009). Past, present and future mathematical models for buildings. *Intelligent Buildings International*, 1(1), 23–38. <http://doi.org/10.3763/inbi.2009.0009>
- Mart, A., & Vocatoria, C. O. (2010). ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE UN EDIFICIO CON ENERGYPLUS : Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial.
- Miño, I., Lobato, A., & Labus, J. (2013). Simulaciones energéticas como herramienta para evaluación térmica de las viviendas sociales del Ecuador: Caso Yachay. *Investigación Sostenible: Energías Renovables Y Eficiencia Energética*, (2012), 1–8.
- Monroy, M. M. (1995). *COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CERRAMIENTOS SOLEADOS*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Oliveti, G., Arcuri, N., Mazzeo, D., & De Simone, M. (2015). A new parameter for the dynamic analysis of building walls using the harmonic method. *International Journal of Thermal Sciences*, 88, 96–109. <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.09.006>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Prada, a., Cappelletti, F., Baggio, P., & Gasparella, a. (2014). On the effect of material uncertainties in envelope heat transfer simulations. *Energy and Buildings*, 71, 53–60. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.083>
- Premrov, M., Žegarac Leskovar, V., & Mihalič, K. (2015). Influence of the building shape on the energy performance of timber-glass buildings in different climatic conditions. *Energy*, 1–11. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.027>
- Rodríguez-Soria, B., Domínguez-Hernández, J., Pérez-Bella, J. M., & del Coz-Díaz, J. J. (2014). Review of international regulations governing the thermal insulation requirements

- of residential buildings and the harmonization of envelope energy loss. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 78–90. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.009>
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- Sandberg, M., Mattsson, M., Wigö, H., Hayati, a., Claesson, L., Linden, E., & Khan, M. a. (2015). Viewpoints on wind and air infiltration phenomena at buildings illustrated by field and model studies. *Building and Environment*, 92, 504–517. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.001>
- Seem, J. E. (2007). Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings. *Energy and Buildings*, 39(1), 52–58. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.033>
- Singh, M. C., & Garg, S. N. (2011). Suitable Glazing Selection for Glass-Curtain Walls in Tropical Climates of India. *ISRN Renewable Energy*, 2011, 1–11. <http://doi.org/10.5402/2011/484893>
- Skeiker, K. (2007). Comparison of methodologies for TMY generation using 10 years data for Damascus, Syria. *Energy Conversion and Management*, 48(7), 2090–2102. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.014>
- Swift, J., & Lawrence, T. M. (2007). The ASHRAE GreenGuide : One Means of Establishing a Link between Sustainable Design Practitioners. *Indoor Air*.
- Taylor, R. D., Pedersen, C. O., & Lawrie, L. K. (1990). Simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs. *Proceedings of the 3rd International Conference on System Simulation in Buildings*. Retrieved from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/simultaneous_simulation_taylor.pdf
- Tudela, F. (1982). *Ecodiseño*. Mexico.
- Underwood, C., & Yik, F. (2004). *Modelling Methods for Energy in Buildings*. <http://doi.org/10.1002/9780470758533>
- UNEP. (2014). Climate Finance for Cities and Buildings - A Handbook for Local Governments.
- University_of_Illinois. (2013). Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus. *University of Illinois*.
- US Department Of Energy. (2010). EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations. *US Department of Energy*, (c), 1051. <http://doi.org/citeulike-article-id:10579266>
- Yazdaniyan, M., & Klems, J. H. (1994). Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-Rise Buildings. *ASHRAE Transactions*.
- Zaldumbide, D. C. M., & Molestina, C. (2006). El pensamiento simbólico de los habitantes de La Florida (Quito-Ecuador). *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 35(3), 377–395.
- Zupanä, B., & Skrjanc, I. (2001). Theoretical and experimental FUZZY modelling of building thermal dynamic response, 36, 1023–1038.

APÉNDICES

6.1. APÉNDICE A

6.1.1. GOOGLE SKETCHUP

Es un programa de diseño gráfico y modelado tridimensional que permite construir y manipular todo tipo modelos 3D de forma sencilla y rápida.

La herramienta incluye todo tipo de opciones de modelado, desde la creación de figuras geométricas básicas hasta la manipulación de vértices y caras, además de sus herramientas de texturizado, iluminación o renderizado.

6.1.1.1. Interfaz de google sketchup

Una vez descargado e instalado se abre el programa. Aparecerá la pantalla siguiente donde se clica en Empezar a utilizar SketchUp.



Figura 6.1. Pantalla inicial de SketchUp

Automáticamente el programa se prepara para ser iniciado y poder trabajar con él, apareciendo la siguiente pantalla.

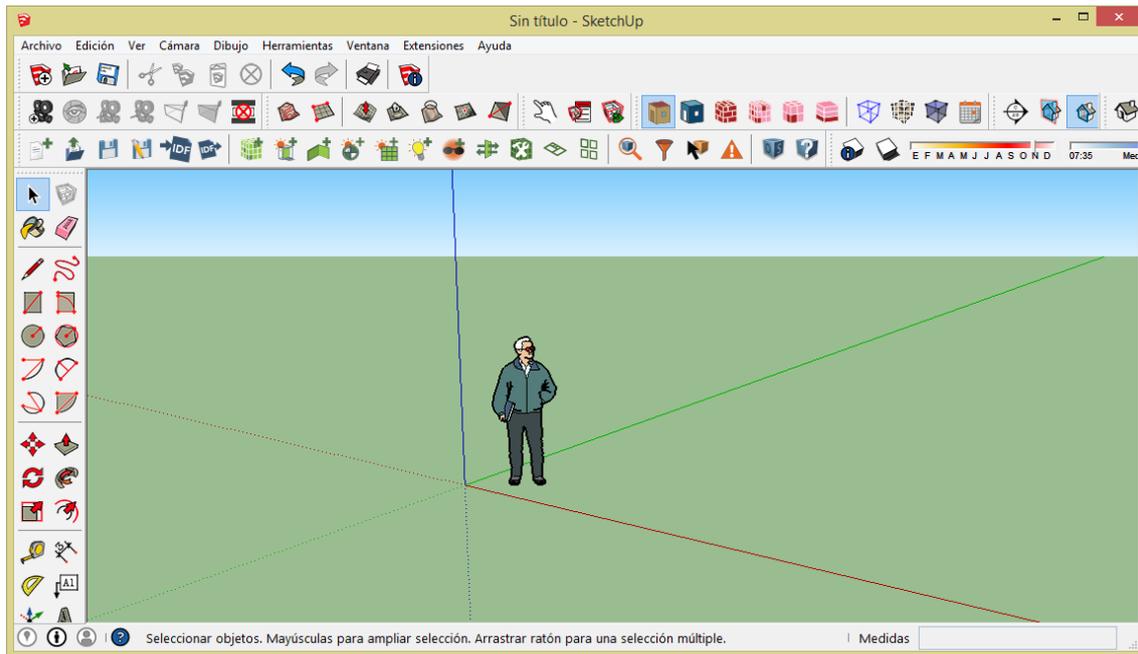


Figura 6.2. Pantalla de dibujo SketchUp

Se puede ver que aparecen todas las funciones que van a ser utilizadas, distribuidas en dos barras de herramientas, la horizontal y la vertical. En el centro de la pantalla aparece Shank, el cual se puede utilizarlo como referencia, aunque como se observa aparecen tres ejes diferenciados por colores que indican una orientación en concreto. SketchUp utiliza un sistema de coordenadas 3D en el que los puntos se identifican en el espacio mediante su posición en tres niveles de suelo (cota zero): valores X, Y y Z positivos o negativos (por encima o por debajo del suelo).

En SketchUp, el valor X positivo o negativo se representa mediante líneas rojas continuas o punteadas, respectivamente; Y positivo o negativo se representa respectivamente mediante líneas de eje verdes continuas o punteadas; y Z positivo o negativo (por encima o por debajo del suelo) se representa mediante líneas azules continuas o punteadas. El plano en el que descansan las líneas de eje rojas y verdes se denomina plano de suelo.

La interfaz de usuario de SketchUp está diseñada para que su uso resulte lo más sencillo posible. Los elementos principales de la interfaz de SketchUp son la barra de título, los menús, la barra de herramientas, el área de dibujo, la barra de estado y el cuadro de control de valores (CCV):

- Barra de título: asignar un nombre al proyecto.

- Menús: aparecen bajo la barra de título. La mayoría de herramientas, comandos y ajustes de SketchUp están disponibles en estos menús. Los menús que aparecen de forma predeterminada son: "Archivo", "Edición", "Ver", "Cámara", "Dibujar", "Herramientas", "Ventana" y "Ayuda".
- Las barras de herramientas: aparecen bajo los menús y en el lado izquierdo de la aplicación, contienen un conjunto de herramientas y controles definidos por el usuario.
- Área de dibujo: es el lugar donde se crea el modelo.
- Barra de estado: Área gris situada en la parte inferior de la pantalla.

6.1.2. OPENSTUDIO

OpenStudio® es una multiplataforma (Windows, Mac, y Linux) que contiene una amplia colección de herramientas de ayuda en el modelado energético de edificaciones con EnergyPlus.

El OpenStudio SketchUp Plug-in es una extensión de la popular herramienta de modelado de Trimble SketchUp 3D que permite a los usuarios crear y editar rápidamente la geometría de la edificación necesaria para EnergyPlus. El plugin también permite lanzar simulaciones EnergyPlus y ver los resultados sin dejar SketchUp, además puede explorar los archivos de entrada EnergyPlus para ver la geometría desde cualquier punto de vista, añadir zonas térmicas, estudiar la iluminación natural sobre la zona térmica y realizar estudios precisos de sombreado entre otros.

6.1.2.1. Submenús del Plugin OpenStudio

Este plugin contiene los siguientes submenús (Ver Ilustración 3) de los cuales se mencionara los más importantes:



Figura 6.3. Iconos del Plugin OpenStudio

- Nuevo:** Crea un archivo EnergyPlus nueva entrada. El nuevo archivo se genera de un plantilla que incluye varios objetos de entrada que son necesarios para todos los archivos de entrada EnergyPlus.

- b. **Abrir:** Abre un archivo de EnergyPlus existente de entrada y lo hace utilizando de SketchUp las entidades: los grupos, caras y aristas. El archivo de entrada está ahora asociado con el corriente modelo de SketchUp. Cualquier cambio que haga a las entidades de SketchUp con la norma herramientas (Mover, empujar / tirar, Escala, goma de borrar, etc) se actualizará inmediatamente en EnergyPlus.
- c. **Guardar:** Guarda la entrada de EnergyPlus archivo a su ruta actual. Si el archivo no ha guardado antes, un cuadro de diálogo le pregunta si desea guardar el archivo nuevo.
- d. **Nueva Zona:** Seleccionando "Nueva Zona" al hacer clic en algún lugar de la vista se creara una nueva zona de origen. Un modelo de SketchUp vacío resaltado con un rectángulo azul aparecerá anclado en una esquina de un punto de la construcción. Con el cursor todavía situado sobre el punto de construcción, al hacer doble clic se podrá iniciar a editar la zona. Cualquier entidad SketchUp nueva que se dibuje dentro de la zona con el estándar herramientas (rectángulo, polígono, lápiz, etc) inmediatamente EnergyPlus agregará nuevas superficies de transferencia de calor (BuildingSurface, FenestrationSurface, Sombra) para el archivo de entrada. Suelos, paredes, techos, ventanas, puertas y sombreado adjunta superficies que son automáticamente deducidas de sus inclinaciones y posiciones.
- e. **Sombreado:** Esta herramienta funciona de manera casi idéntica a la herramienta de la zona nueva, a excepción de que cualquier nueva entidad SketchUp que se trace en el interior del grupo, inmediatamente se agregará un sombreado independiente de la nueva superficie para el archivo de entrada, en lugar de las superficies de transferencia de calor.

6.1.3. ENERGYPLUS

EnergyPlus es un programa de simulación energética de edificios que los ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar el consumo de energía tanto, para la calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, agregar y procesar cargas térmicas y el uso del agua en los edificios (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY,s.f.).

EnergyPlus tiene sus raíces en los programas BLAST y DOE-2. BLAST (Análisis de Cargas de Edificios y Sistemas Termodinámicos) y DOE-2 fueron desarrollados y lanzado a finales de 1970 y principios de 1980 como herramientas de simulación de energía y de cargas térmicas.

Al igual que sus programas padres, EnergyPlus es un programa de análisis energético y simulación de cargas térmicas. EnergyPlus calcula las cargas de calefacción y refrigeración necesarias para mantener puntos de ajuste de control térmico, condiciones en un sistema HVAC, y el consumo energético de los equipos de la planta primaria, así como muchos detalles de simulación de otro tipo que son necesarios para comprobar que la simulación está funcionando como se desea.

Aunque es importante tener en cuenta lo que EnergyPlus es, también es importante recordar lo que no es:

EnergyPlus no es una interfaz de usuario. Está destinado a ser el motor de simulación en torno al cual una interfaz de terceros puede ser envuelto. Las entradas y salidas son simple texto ASCII.

EnergyPlus no es un reemplazo de ingeniero, arquitecto o diseñador. No comprueba la entrada de parámetros su aceptabilidad o rango, o el intento de interpretar los resultados. Si bien muchos programas GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) ayudan al usuario a afinar y corregir los errores de ingreso, los ingenieros y arquitectos siempre serán una parte vital del proceso.

6.1.3.1. Programa EP-launch

En esta sección se le dará a conocer el programa de EP-launch, que le ayuda a ejecutar EnergyPlus. EP-launch se ve y actúa muy parecido a un programa estándar de Windows [™]. Para ayudar a los que están en el entorno de Windows, se ha incluido el programa de EP-launch.

Como todos los programas de simulación, EnergyPlus consiste en algo más que un archivo ejecutable. EnergyPlus necesita varios archivos de entrada que describen el edificio para ser modelado y el medio ambiente que lo rodea. El programa produce varios archivos de salida, que deben ser descritos o tratados

con el fin de dar sentido a los resultados de la simulación. Por último, incluso en modo autónomo(University_of_Illinois, 2013).

EP-launch es un componente opcional de la instalación EnergyPlus de Windows (no está disponible para las plataformas Linux y Mac). Para los usuarios que desean una manera sencilla de seleccionar archivos y ejecutar EnergyPlus, EP-launch ofrece esto y mucho más. Además, el documento EP-launch puede ayudar a abrir un editor de texto para los archivos de entrada y de salida, abra una hoja de cálculo para los archivos de resultados del procesador de correos, un navegador web para el archivo de resultados de tabla, y poner en marcha un visor para el archivo de dibujo seleccionado.

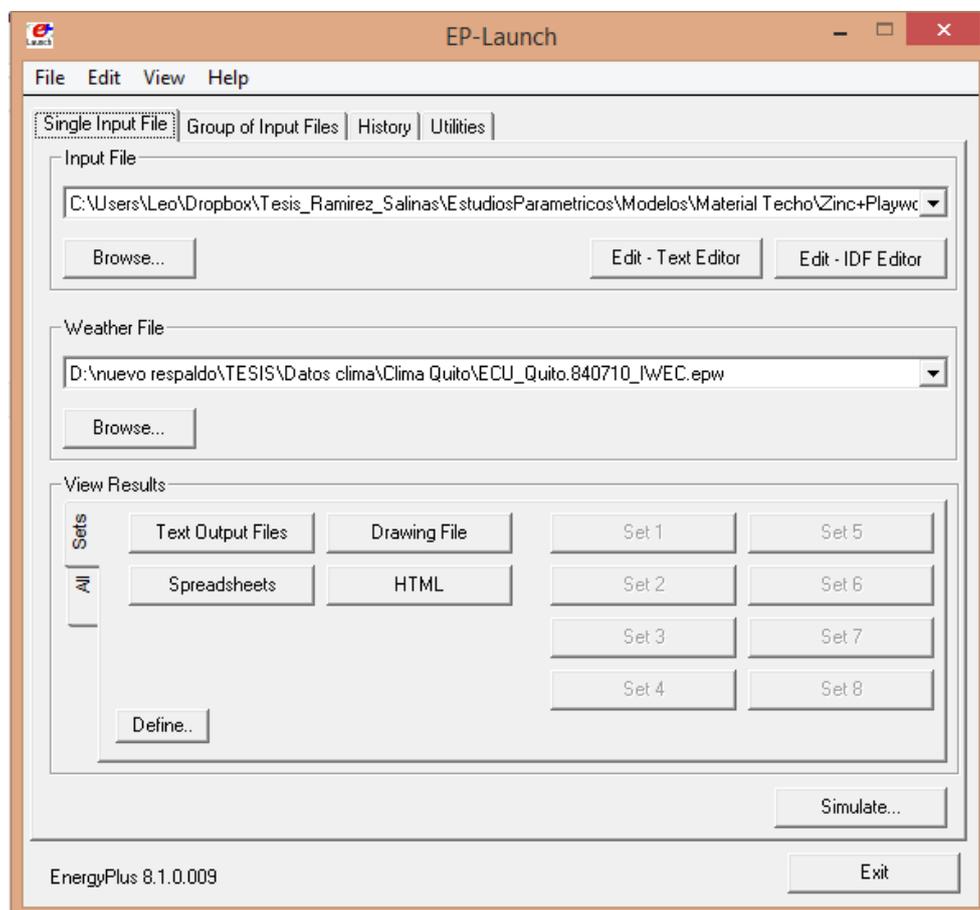


Figura 6.4. Pantalla de EP-Launch

EP-launch se encuentra en el directorio / carpeta principal de EnergyPlus. Además, está disponible en el menú contextual para EnergyPlus. Haciendo doble clic en el icono de la EP-lanzamiento se obtiene la pantalla que se muestra arriba (Ilustración 2) para el funcionamiento de un único archivo de entrada.

6.1.3.2. Selección de archivos meteorológicos de entrada.

El archivo de entrada y los archivos de tiempo meteorológico pueden seleccionarse de manera individual presionando el botón Browse en Input file y Weather file respectivamente, o presionando en la flecha se muestra un listado de los archivos recientemente usados.

6.1.3.3. Ejecución de un solo archivo de entrada

Una vez creado y configurado el archivo de entrada, después de seleccionar el tiempo, basta con pulsar el botón Simulate para iniciar el motor de simulación de EnergyPlus. En este punto, una ventana de MS-DOS se despliega en la pantalla y muestra el progreso de la simulación. Este proceso será rápido si se ha seleccionado un rango corto de días a simular.

En cuanto a los resultados después de ejecutar una simulación y se cierra la ventana de MS-DOS negro, EnergyPlus ha completado, y un mensaje de estado se muestra véase la Ilustración 3:

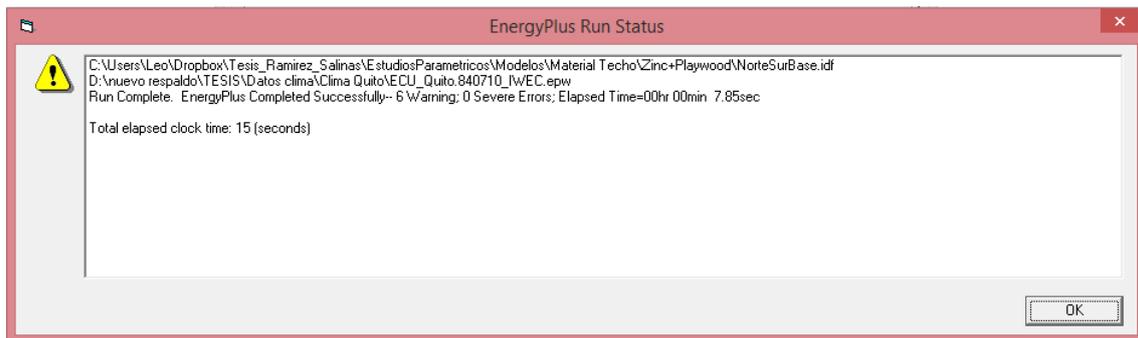


Figura 6.5. Resultados de la Simulación

Este estado se da una visión general rápida de si hay advertencias/warnings (donde debes mirar que ha fallado, pero no es obligado arreglarlo), o grave/several (se debe solucionar para poder simular correctamente), así como el tiempo que tomó para completarse la simulación.

Una forma de abrir archivos de salida fácilmente es mediante el uso del panel de resultados de botones que se muestran en la Ilustración 4. Dos paneles de botones pueden ser utilizados para ver los resultados, uno muestra mediante la ficha "All" en el borde izquierdo y mediante el uso de la pestaña "Sets" también

en el borde izquierdo. La pestaña de "All" muestra todos los diferentes archivos por extensión de archivo que se pueden ver de forma individual.

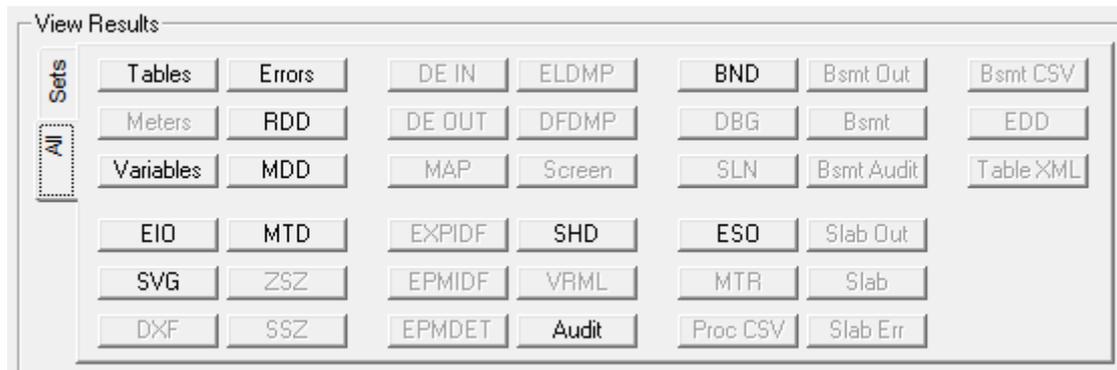


Figura 6.6. Panel de resultados

Los archivos de salida más importantes se muestran a continuación:

1. ESO – Informe de las variables de salida.
2. RDD – Lista de las posibles salidas que puedes observar con tu simulación.
3. MDD – Lista de las posibles mediciones que observarás en la simulación.
4. Errors – Listado de errores y avisos.
5. BND – Informe detallado del sistema HVAC y sus nodos de conexión.
6. MTR – Informe de las medidas de salida.
7. SVG - Diagrama HVAC.
8. DXF – Archivo de dibujo en formato AutoCAD DXF.
9. CSV – Archivo tipo Microsoft Excel

En EnergyPlus una vez terminada la simulación se puede observar la salida que se desee. Para visualizar la salida que se quiere, se acude al archivo RDD y se copia el nombre de la variable que se quiera en el archivo IDF en el text editor, como se observa en la figura:

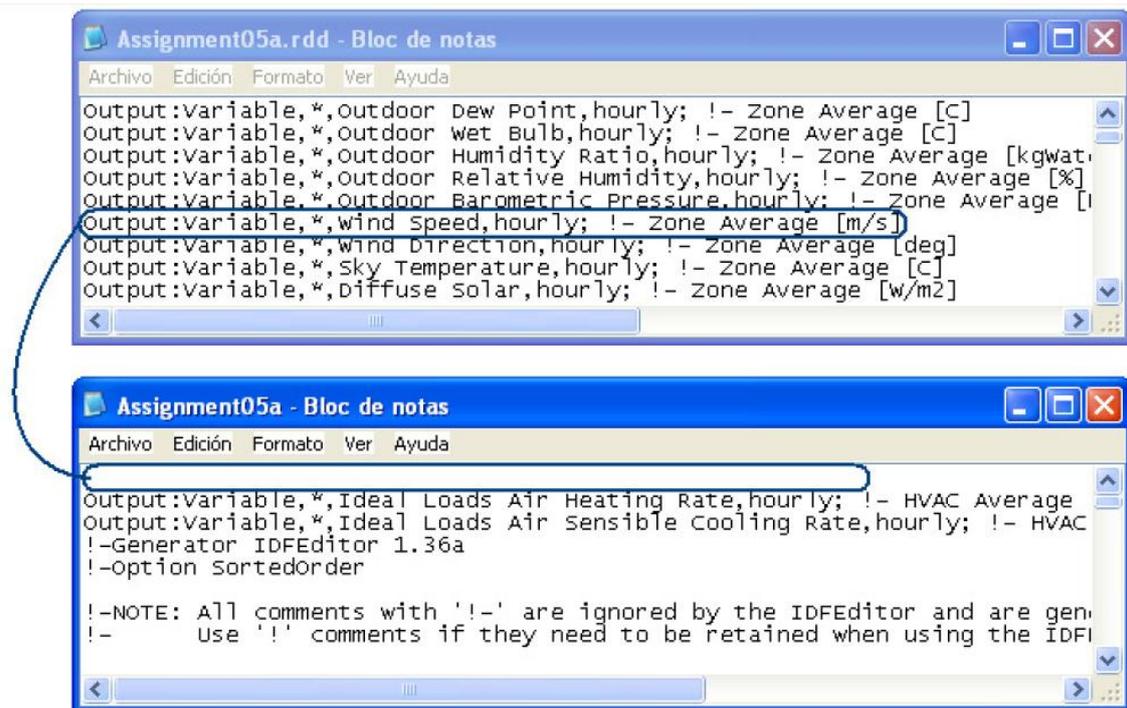


Figura 6.7. Asignación de salidas al archivo IDF

En esta imagen se muestra como abriendo el archivo RDD se escoge por ejemplo la variable de salida de “Wind Speed”, es decir, la velocidad del viento, la cual nos da la media en una zona concreta que se asigna, con una periodicidad horaria. Esta línea, se copia en el archivo IDF abriéndolo con EP-Launch/Text Editor y copiándolo en cualquiera posición del texto, no importa. Se cierra guardando y se le da al botón de simular.

Una vez lista la simulación, se puede abrir el fichero de salida con la variable que se ha pedido, hay diferentes manera de ver estas salidas, una de ellas y la más sencilla es a partir de un fichero Microsoft Excel, es la primera opción de la ventana rápida de resultados, el botón CSV.

Se abrirá de manera automática un Excel, con los valores como se muestra en la ilustración 6, donde en la primera columna se observa el tiempo de muestra y en las siguientes columnas primero se observa el nombre de la salida y las unidades que tiene, y las filas siguientes se pueden observar los resultados.

	A	B	C	D	E
			Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Hourly)	THERMAL ZONE 1:Zone Mean Air Temperature [C](Hourly)	THERMAL ZONE 1:Zone Air Temperature [C](Hourly)
1	0	Date/Time			
2	1	01/01 01:00:	11,125	14,92511227	14,92511227
3	2	01/01 02:00:	10,8875	14,71322699	14,71322699
4	3	01/01 03:00:	10,3875	14,47431023	14,47431023
5	4	01/01 04:00:	9,8875	14,22034454	14,22034454
6	5	01/01 05:00:	9,45	13,96155313	13,96155313
7	6	01/01 06:00:	9,1125	13,70274535	13,70274535
8	7	01/01 07:00:	9	13,6032408	13,6032408
9	8	01/01 08:00:	9,625	13,47964014	13,47964014

Figura 6.8. Muestra de archivo CSV

Esto es muy útil si solamente se tiene unas pocas salidas, y el periodo de simulación es corto, en cambio simular rangos de tiempo como semanales o mensuales supone miles de filas de resultados, y es complicada su comprensión.

6.1.4. IDF EDITOR

IDF Editor es donde se debe añadir todas las características del edificio a simular, se escoge que elementos componen la estructura del modelo, se indicará tanto la situación geográfica donde estará ubicado, como el material de que estarán hechas las ventanas, paredes, también se puede añadir datos como el número medio de personas, iluminación, infiltraciones etc.

Se empieza abriendo el IDF Editor, donde se observan variables de entrada, agrupadas en familias como por ejemplo: localización, materiales, elementos constructivos de la superficie, etc.

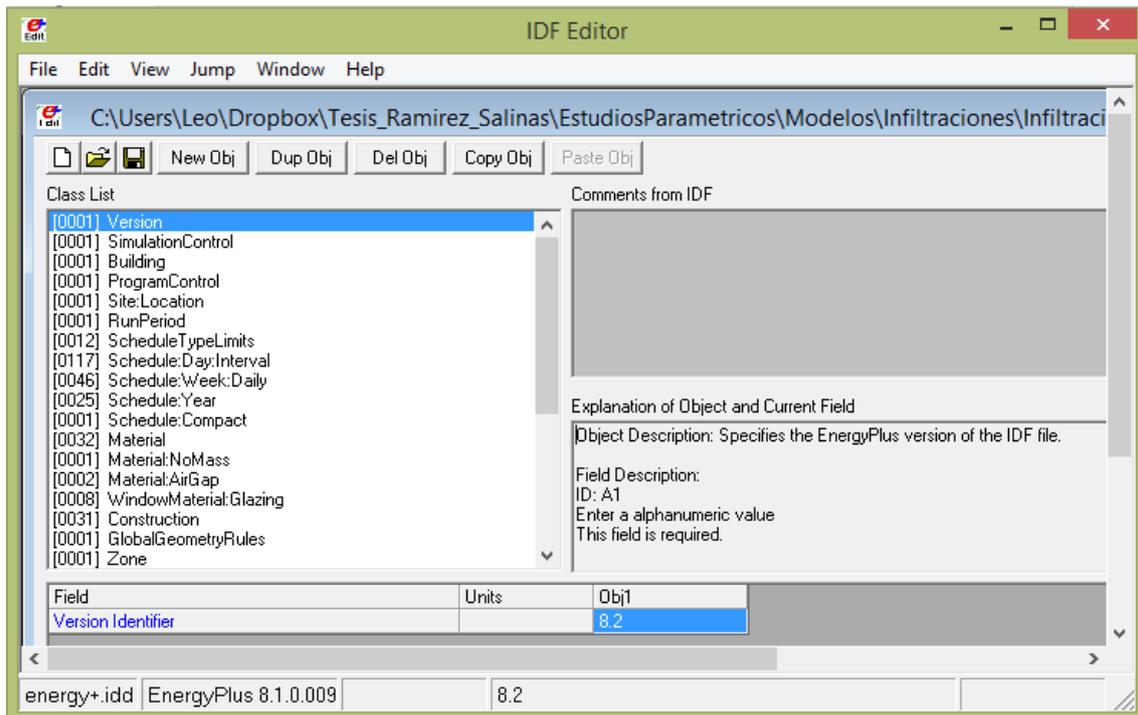


Figura 6.9. Ventana Inicial IDF Editor

Lo primero que se debe poner en el IDF Editor es la versión (Versión) del programa, en este caso es la 8.1.

Para un estudio más detallado del IDF Editor se recomienda visitar la página <https://energyplus.net/documentation> donde podrán encontrar información detallada de todo el programa EnergyPlus, incluyendo IDF Editor. Mientras que aquí se muestra un pequeño resumen de sus partes principales.

- **SIMULATION CONTROL:** Dentro de SimulationControl se debe poner en afirmativo la última opción a la que hace referencia a la simulación meteorológica. Ya que si no estuviera activado, se debería introducir manualmente los valores de temperatura anual
- **BUILDING:** Dentro de Building se tiene de añadir un nombre al edificio. Se puede observar que está a 0° del eje que marca el Norte ya que se trabaja con coordenadas absolutas y la orientación se puede modificar aquí y también donde se creó el modelo 3D del edificio.
- **SITE LOCATION:** Seguidamente se dirige hacia la familia de Location and Climate, donde se encuentra el primer parámetro a completar Site:Location en esta casilla se tendrá que escribir un nombre de la ubicación del archivo

- **RUN PERIOD:** La siguiente variable de entrada que se incluirá será Run Period, sirve para decidir el número de días que se desea realizar la simulación
- **MATERIAL:** Posteriormente, se selecciona la familia de parámetros llamada Surface Construction Elements, en la cual se definirá todos los materiales que compondrán el modelo, tanto las capas de los materiales que constituyen las paredes, tejados, las ventanas, incluso el aire que haya entre ventanas si se trata de un acristalamiento doble, etc.
- **SIMPLE GLAZING SYSTEM & WINDOWS MATERIAL GLAZING:** Ahora se hace referencia al sistema simplificado de acristalamientos SimpleGlazingSystem, el cual sirve para definir las ventanas del modelo, donde solo se tiene que añadir un nombre y escribir unas pocas características globales de acristalado que se desea colocar. Por lo que respecta al WindowMaterial:Glazing, es la versión detallada de acristalamientos o ventanas. Cuando se habla de ventanas exteriores, la parte delantera es el lado del cristal que da al exterior y la parte de atrás es el que queda más cerca de la zona interior, para ventanas que están entre zonas, la parte delantera es el lado más cercano a la zona adyacente a la zona de la ventana y se define como la parte de atrás como el lado más cercano a la zona interior.
- **WINDOW MATERIAL: GLASS:** Para terminar de hablar sobre el tema de acristalamientos se muestra a continuación el WindowMaterial: Gas. Aquí se habla del tipo de gas que hay en un cristal doble, entre cristal y cristal.
- **CONSTRUCTION:** Para las paredes, techos, pisos, ventanas y puertas, se tiene que ir a la pestaña de Construction, las construcciones son "construidas" a partir de los materiales incluidos en Materials. Cada capa de la construcción es un nombre de material que figura en el orden de afuera a dentro. Puedes incluir hasta diez capas (es una de las pocas limitaciones en EnergyPlus).
- **GLOBAL GEMOETRY RULES:** Dentro de la familia o grupo Thermal Zones and Surfaces, se desplaza hasta GlobalGeometryRules donde se

deberá explicar en detalle la descripción de los parámetros geométricos para que posteriormente lo utilice EnergyPlus.

- **BUILDING SURFACES:** Para la descripción de las superficies se debe tener en cuenta hacia donde esta encarada la superficie, para así añadir la mejor opción, dentro del campo Outside Boundary Condition.
- **FRAME AND DIVIDER:** Una parte fundamental en la creación real de ventanas es poder insertar marcos o divisores. Un marco rodea el vidrio en una ventana. Se supone que todas las características de marco como el ancho, la conductancia y absorción solar son los mismos para la parte superior, inferior y los elementos secundarios del marco.
- **ZONE VENTILATION:** En cuanto a la ventilación, es el flujo de aire del ambiente en una zona termal con el fin de proporcionar una cierta cantidad de refrigeración no mecánica.
- **INTERNAL GAINS:** No toda la influencia del consumo de energía en el edificio se debe a las condiciones ambientales. Este grupo de objetos describen otros beneficios internos (personas, luminaria, equipamiento eléctrico) (Mart & Vocatoria, 2010).

Con la el fin de obtener una mejora energética de manera teórica en el edificio, se puede implementar a la simulación mejoras como: Acristalamiento doble y Voladizos, características que se le puede incluir al modelo en el IDF Editor.

6.2. APÉNDICE B

6.2.1. RESULTADOS DEL PRIMER ESTUDIO PARAMÉTRICO

Se presenta los resultados del primer estudio paramétrico en las gráficas de frecuencia de distribución de temperatura, en las cuales se puede apreciar las horas que se mantiene la zona a determinada temperatura en el año estudiado.

6.2.1.1. Materiales paredes

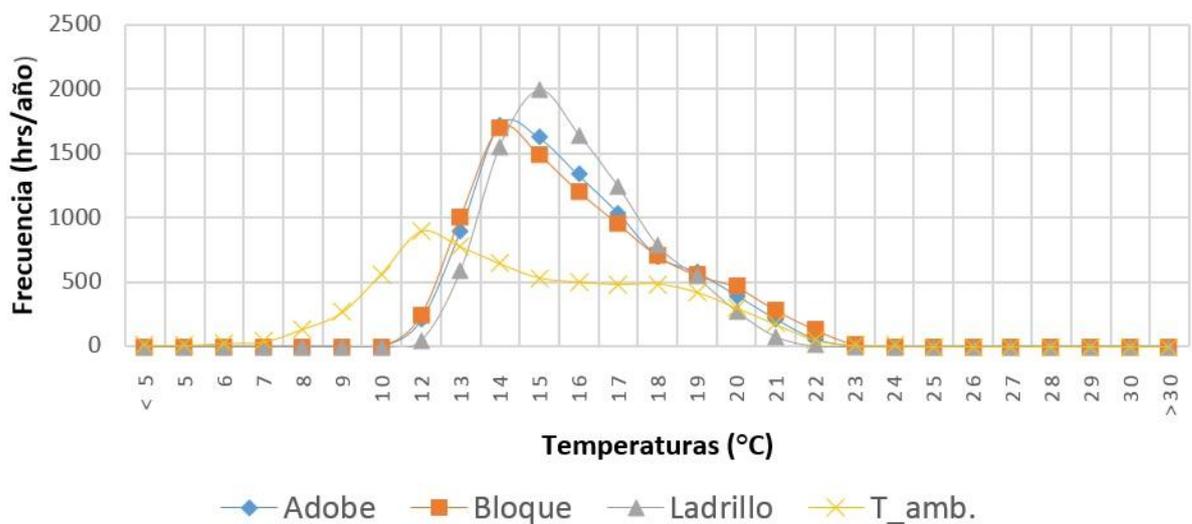


Figura 6.10. Distribución de Temperaturas al Variar Materiales del Paredes

6.2.1.2. Materiales techo

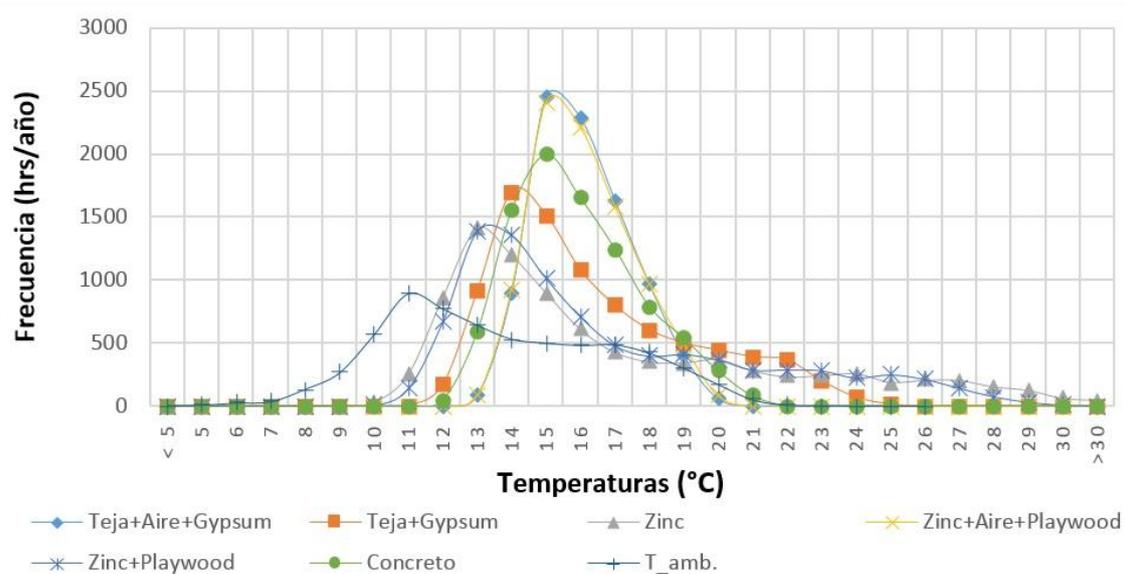


Figura 6.11. Distribución de Temperaturas al Variar Materiales del Techo

6.2.1.3. Orientación de la construcción

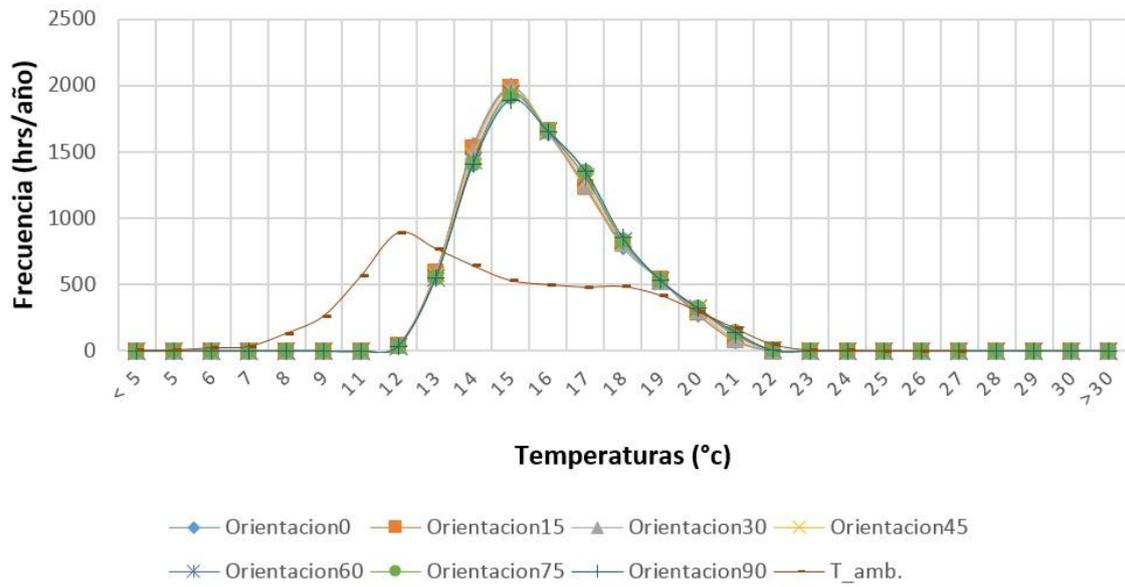
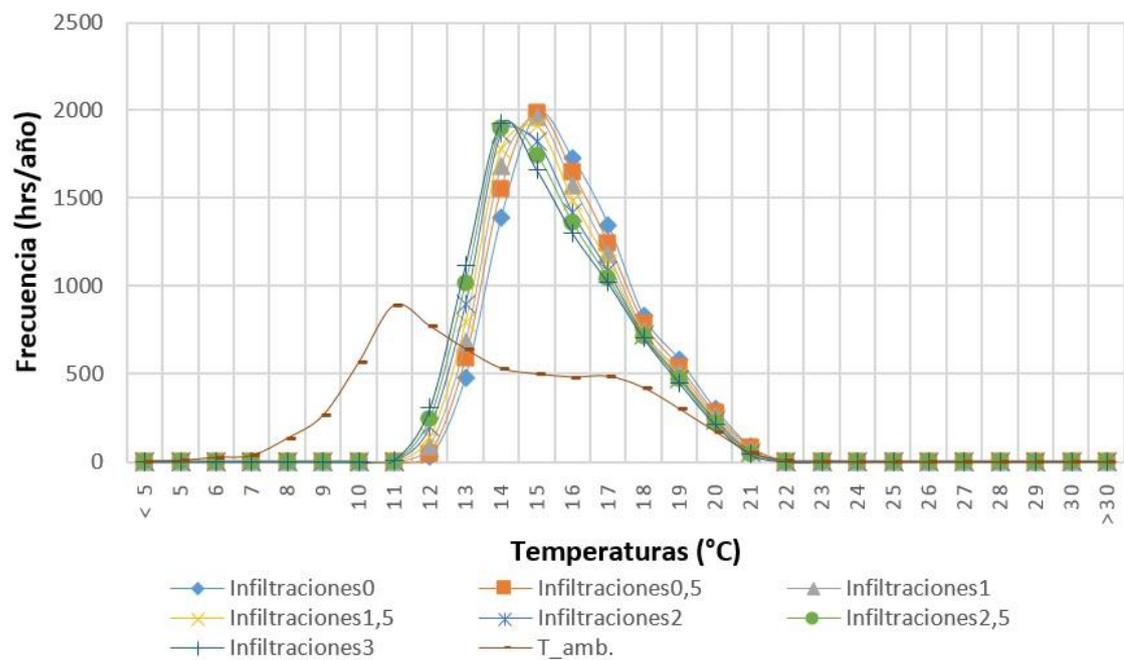


Figura 6.12. Distribución de Temperaturas al Variar la Orientación de la Construcción

6.2.1.4. Infiltraciones

Figura 6.13. Distribución de Temperaturas al Variar las Infiltraciones



6.2.1.5. Porcentaje de acristalamiento

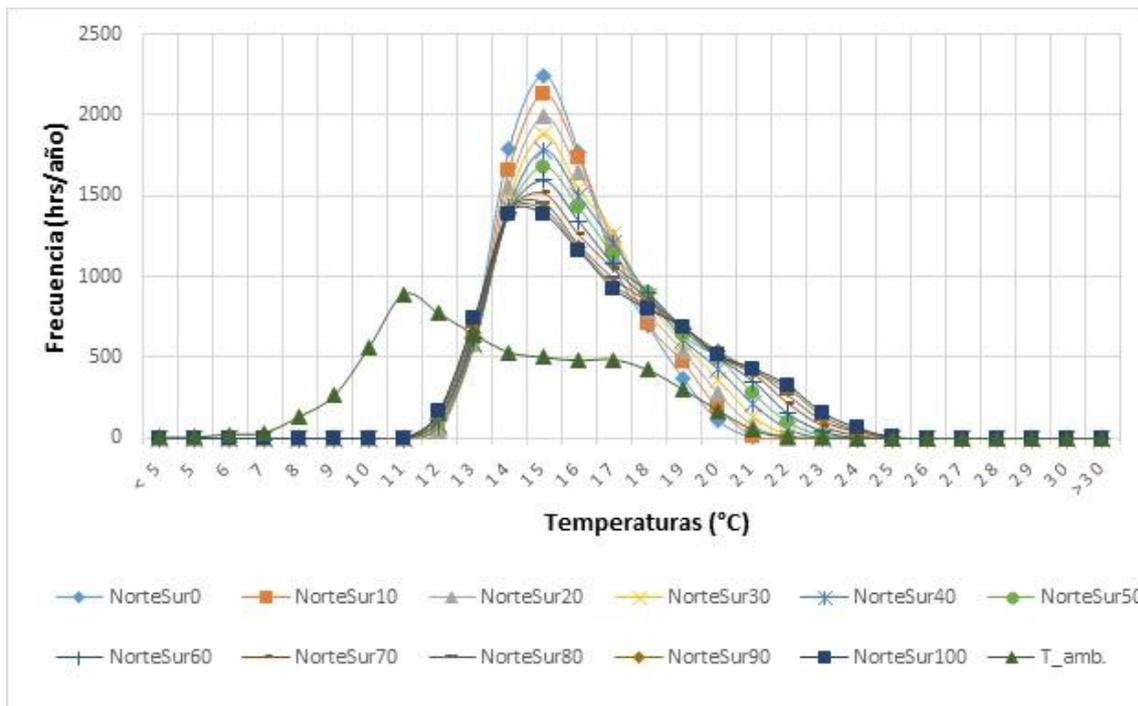


Figura 6.14. Distribución de Temperaturas al Variar las Ventanas Norte y Sur

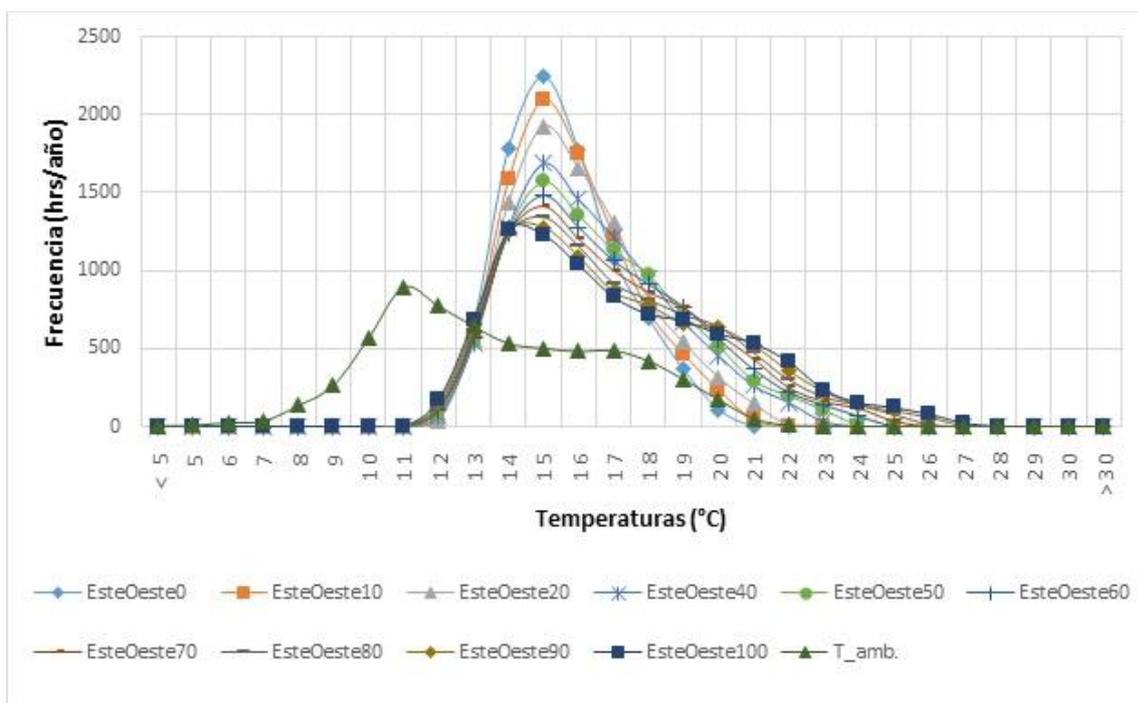


Figura 6.15. Distribución de Temperaturas al Variar las Ventanas Este y Oeste

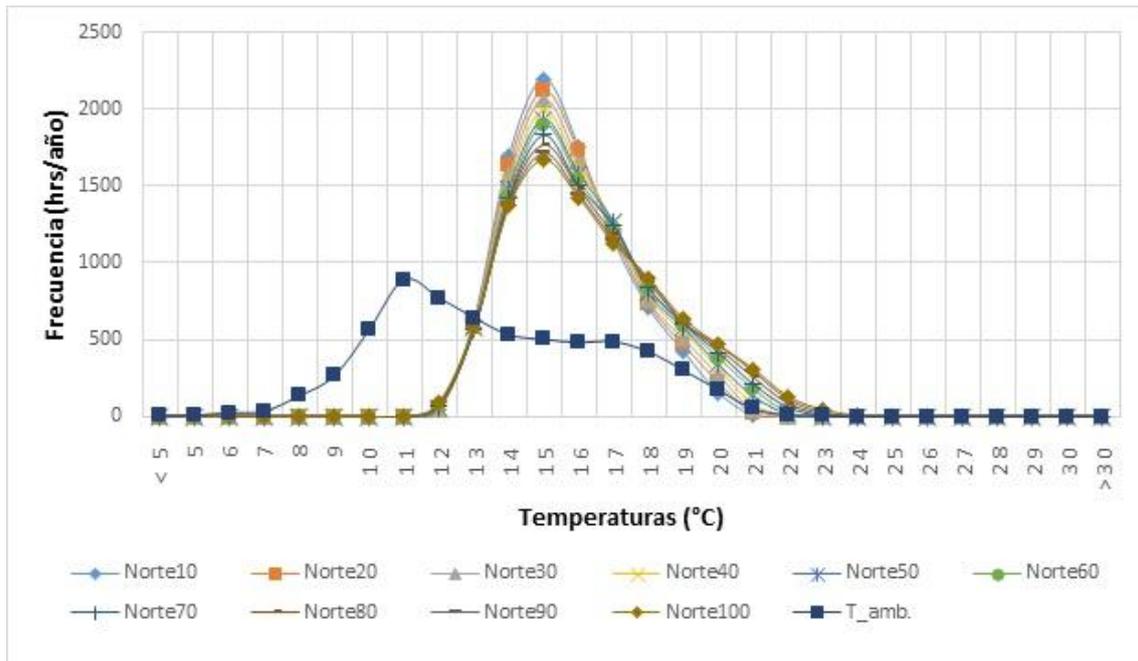


Figura 6.16. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Norte

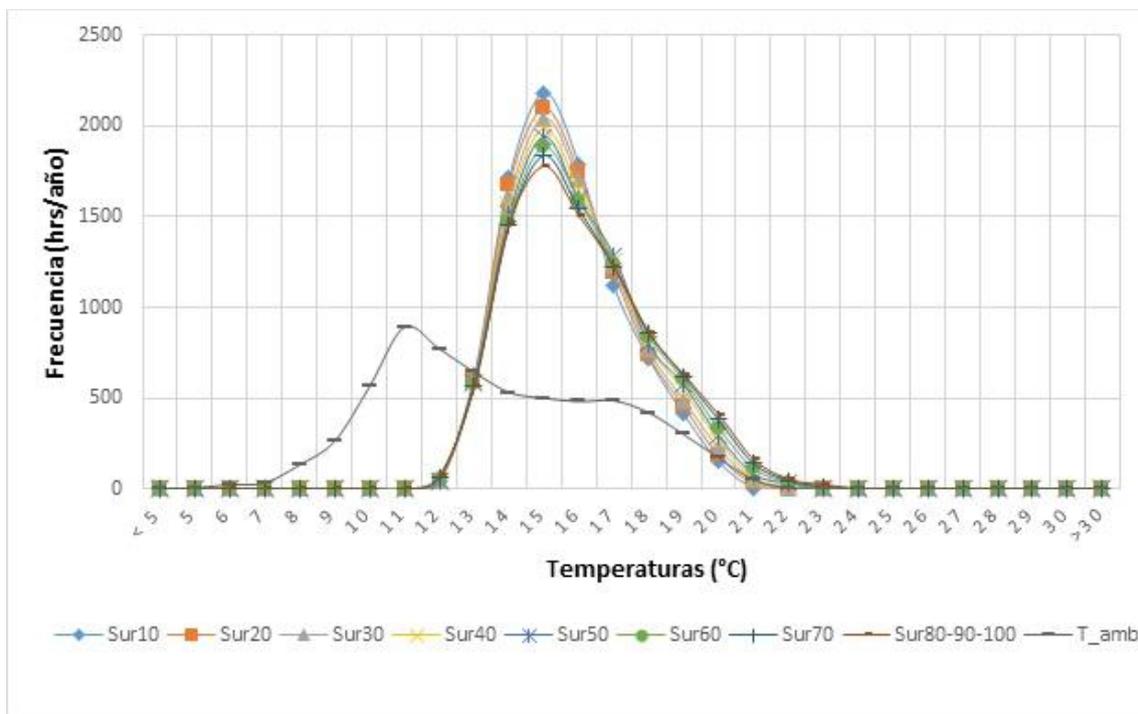


Figura 6.17. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Sur

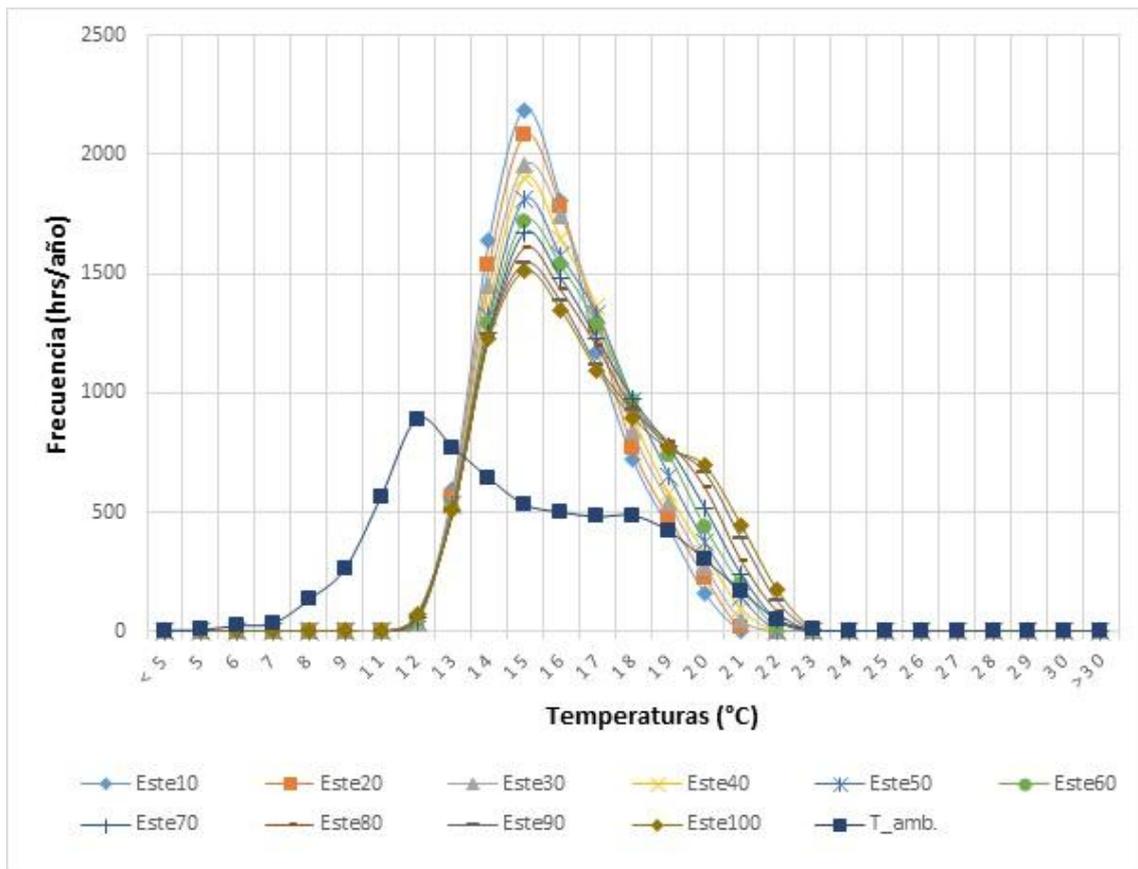


Figura 6.18. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Este

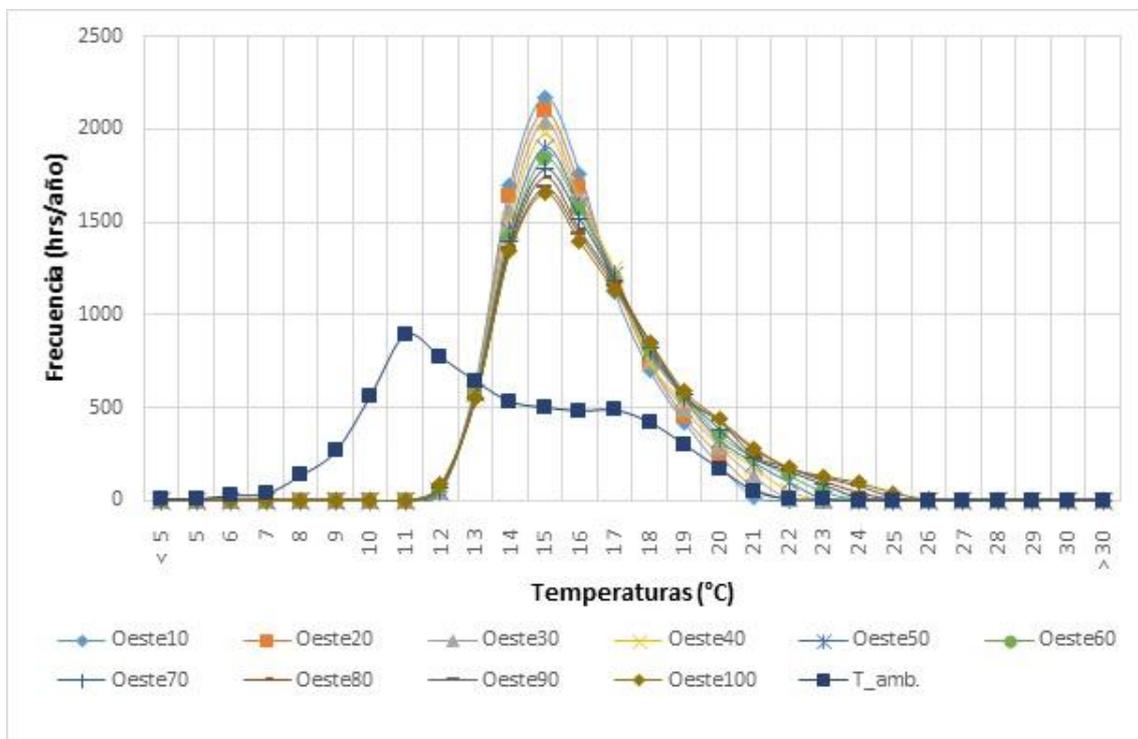


Figura 6.19. Distribución de Temperaturas al Variar la Ventana Oeste

6.3. APENDICE C

6.3.1. CÓDIGO MATLAB

A continuación se presenta el código realizado en Matlab para el modelo B en la validación, se debe tener en cuenta que los demás modelos se realizan manipulando las variables del programa que son: la geometría del modelo y las propiedades de los materiales.

```

1.   clc
2.   close all
3.   clear all
4.   tic
5.   %VARIABLES DE SALIDA DE ENERGYPLUS - UTILIZADOS PARA CÁLCULO DE
   ERRORES (EP=ENERGYPLUS)
6.   load 'TZ_EP'           %Temperatura de la zona
7.   %TEMPERATURAS SUPERFICIALES
8.   load 'TIPE_EP'        %Temperatura superficial interna pared este
9.   load 'TEPE_EP'        %Temperatura superficial externa pared este
10.  load 'TIPN_EP'        %Temperatura superficial interna pared norte
11.  load 'TEPN_EP'        %Temperatura superficial externa pared norte
12.  load 'TIPO_EP'        %Temperatura superficial interna pared oeste
13.  load 'TEPO_EP'        %Temperatura superficial externa pared oeste
14.  load 'TIPS_EP'        %Temperatura superficial interna pared sur
15.  load 'TEPS_EP'        %Temperatura superficial externa pared sur
16.  load 'TITCH_EP'       %Temperatura superficial interna pared techo
17.  load 'TETCH_EP'       %Temperatura superficial externa pared techo
18.  load 'TIPSO_EP'       %Temperatura superficial interna pared piso
19.  load 'TEPSO_EP'       %Temperatura superficial externa pared piso
20.  load 'TIPRT_EP'       %Temperatura superficial interna pared puerta
21.  load 'TEPRT_EP'       %Temperatura superficial externa pared puerta
22.  load 'TIVN_EP'        %Temperatura superficial interna pared ventana norte
23.  load 'TEVN_EP'        %Temperatura superficial externa pared ventana norte
24.  load 'TIVS_EP'        %Temperatura superficial interna pared ventana sur
25.  load 'TEVS_EP'        %Temperatura superficial externa pared ventana sur
26.  %DATOS DEL ARCHIVO DEL CLIMA
27.  load 'TAMB'           %Temperatura ambiente
28.  load 'TSKY'           %Temperatura del cielo
29.  load 'TGND'           %Temperatura del suelo
30.  load 'PRTC'           %Precipitación
31.  load 'Vm'             %Velocidad del viento medida en la estación
   meteorológica
32.  load 'Ag'             %Dirección del viento - Angulo con respecto al norte
33.  %Radiación
34.  load Ib               %Intensidad de la radiación directa
35.  load Ig               %Intensidad de la radiación difusa
36.  load Is               %Intensidad de la radiación difusa reflejada del suelo
37.  %ANGULOS SOLARES
38.  load COS_PN           %Coseno del Ángulo de incidencia del sol pared norte
39.  load COS_PS           %Coseno del Ángulo de incidencia del sol pared sur
40.  load COS_PE           %Coseno del Ángulo de incidencia del sol pared este
41.  load COS_PO           %Coseno del Ángulo de incidencia del sol pared oeste
42.  load COS_TCH         %Coseno del Ángulo de incidencia del sol techo
43.  load COS_PRT         %Coseno del Ángulo de incidencia del sol puerta
44.  load COS_VN           %Coseno del Ángulo de incidencia del sol ventana norte
45.  load COS_VS           %Coseno del Ángulo de incidencia del sol ventana sur
46.  %VARIABLES DEL PROGRAMA
47.  %TIEMPO EN LA SIMULACIÓN
48.  dt=3600;              %Diferencial de tiempo
49.  h=8760;               %Número de horas de la simulación
50.  J=8;                  %Número máximo de Iteraciones
51.  %GEOMETRÍA

```

```

52. dxv=0.0005;           %Distancia entre nodos ventanas
53. dx=0.01;             %Distancia entre nodos pared - puerta - techo - piso
54. %PAREDES
55. Lxprd=0.15;          %Espesor de la pared
56. Nprd=Lxprd/dx+1;     %Número de nodos
57. APE=15;              %Área pared Este
58. APN=12;              %Área pared Norte
59. APS=9;                %Área pared Sur
60. APO=15;              %Área pared Oeste
61. %PISO
62. Lxpso=0.15;          %Espesor del piso
63. Npso=Lxpso/dx+1;     %Número de nodos
64. APSO=36;             %Área piso
65. %TECHO
66. Lxtch=0.12;          %Espesor de la pared
67. Ntch=Lxtch/dx+1;     %Número de nodos
68. ATCH=36;             %Área techo
69. %PUERTA
70. Lxprrt=0.05;         %Espesor de la puerta
71. Nprrt=Lxprrt/dx+1;   %Número de nodos
72. APRT=3;              %Área puerta
73. %VENTANAS
74. Lxv=0.005;           %Espesor de la ventana
75. H_v=1.5;             %Altura de la ventana
76. Nv=Lxv/dxv+1;       %Número de nodos
77. AVN=3;               %Área ventana norte
78. AVS=3;               %Área ventana sur
79. %PROPIEDADES MATERIAL
80. %PAREDES
81. ab=0.7;              %Absortancia paredes
82. k_prd=0.73;          %Conductividad térmica - W/(m*K)
83. rho_prd=1800;        %Densidad - Kg/m3
84. cp_prd=920;          % Calor específico - J/(kg*K)
85. alp_prd=k_prd/(rho_prd*cp_prd); %Difusividad térmica - m2/s
86. Fo_prd=dt*alp_prd/dx^2; %Número de Fourier
87. %PISO
88. ab_pso=0.75;         %Absortancia piso
89. k_pso=1.4;           %Conductividad térmica - W/(m*K)
90. rho_pso=2400;        %Densidad - Kg/m3
91. cp_pso=1050;         % Calor específico - J/(kg*K)
92. alp_pso=k_pso/(rho_pso*cp_pso); %Difusividad térmica - m2/s
93. Fo_pso=dt*alp_pso/dx^2; %Número de Fourier
94. %TECHO
95. ab_tch=0.75;         %Absortancia techo
96. k_tch=0.72;          %Conductividad térmica - W/(m*K)
97. rho_tch=1850;        %Densidad - Kg/m3
98. cp_tch=1000;         % Calor específico - J/(kg*K)
99. alp_tch=k_tch/(rho_tch*cp_tch); %Difusividad térmica - m2/s
100. Fo_tch=dt*alp_tch/dx^2; %Número de Fourier
101. %PUERTA
102. ab_prrt=0.75;        %Absortancia puerta
103. k_prrt=0.14;         %Conductividad térmica - W/(m*K)
104. rho_prrt=1000;       %Densidad - Kg/m3
105. cp_prrt=1210;        % Calor específico - J/(kg*K)
106. alp_prrt=k_prrt/(rho_prrt*cp_prrt); %Difusividad térmica - m2/s
107. Fo_prrt=dt*alp_prrt/dx^2; %Número de Fourier
108. %VENTANAS
109. ab_v=0.14;          %Absortancia ventanas
110. k_v=0.09;           %Conductividad térmica - W/(m*K)
111. rho_v=2200;          %Densidad - Kg/m3
112. cp_v=830;            % Calor específico - J/(kg*K)
113. alp_v=k_v/(rho_v*cp_v); %Difusividad térmica - m2/s
114. Fo_v=dt*alp_v/dxv^2; %Número de Fourier
115. Trans=0.88;          %Transmitancia solar de la ventana
116. %ZONA TERMICA (AIRE)
117. rho_air=1.2;         %Densidad - Kg/m3
118. cp_air=1213;         %Calor específico - J/(kg*K)
119. V=90;                %Volumen zona térmica

```

```

120. Cz=rho_air*cp_air*V;           %Capacitancia térmica
121. gv=9.8;                        %Gravedad
122. U_air=0.00001586;              %Viscosidad dinámica
123. lamb=0.02;                    %Conductividad térmica
124. INF=40;                       %Infiltraciones
125. %CONSTANTES Y FACTORES DE LA RADIACIÓN
126. Eps=1;                        %Emisividad de la superficie
127. Tao=0.0000000567;             %Constante de Stefan-Boltzmann
128. Fsky=(1+0)/2;                 %Factores vista de radiación de onda larga a el
cielo
129. Fgnd=(1-0)/2;                 %Factores vista de radiación de onda larga a
tierra
130. B=sqrt(0.5*(1+0));            %Factor de vista entre el cielo y aire
131. Fsky_tch=(1+1)/2;            %Factores vista de radiación de onda larga a el
cielo
132. Fgnd_tch=(1-1)/2;            %Factores vista de radiación de onda larga a
tierra
133. B_tch=sqrt(0.5*(1+1));        %Factor de vista entre el cielo y aire
134. %DATOS SOBRE LA VELOCIDAD DEL VIENTO
135. dm=270; %Espesor del perfil de la velocidad del viento en la capa
límite en la estación meteorológica
136. zm=10; %altura sobre el suelo del sensor de velocidad del viento en la
estación meteorológica
137. am=0.14; %Exponente del perfil de la velocidad del viento en la estación
meteorológica
138. al=0.33; %Exponente del perfil de la velocidad del viento en el modelo
139. d=460; %Espesor del perfil de la velocidad del viento en la capa límite
en el modelo
140. z=1.25; %altura del centroide de la construcción con respecto
al suelo
141. Rf=1.52; %Coeficiente de rugosidad.
142.
143. % MATRICES PARA ALMACENAR VALORES CALCULADOS
144. %CONDUCCIÓN
145. %PARED NORTE
146. A_pn=zeros(Nprd,Nprd); %Matriz de Coeficientes
147. T_pn=zeros(h,Nprd); %Matriz de temperaturas nodales
148. C_pn=zeros(Nprd,1); %Matriz de Coeficientes
149. %PARED SUR
150. A_ps=zeros(Nprd,Nprd); T_ps=zeros(h,Nprd);C_ps=zeros(Nprd,1);
151. %PARED ESTE
152. A_pe=zeros(Nprd,Nprd); T_pe=zeros(h,Nprd);C_pe=zeros(Nprd,1);
153. %PARED OESTE
154. A_po=zeros(Nprd,Nprd); T_po=zeros(h,Nprd);C_po=zeros(Nprd,1);
155. %TECHO
156. A_tch=zeros(Ntch,Ntch); T_tch=zeros(h,Ntch);C_tch=zeros(Ntch,1);
157. %PISO
158. A_pso=zeros(Npso,Npso); T_pso=zeros(h,Npso);C_pso=zeros(Npso,1);
159. %PUERTA
160. A_prt=zeros(Nprt,Nprt); T_prt=zeros(h,Nprt);C_prt=zeros(Nprt,1);
161. %VENTANA NORTE
162. A_vn=zeros(Nv,Nv); T_vn=zeros(h,Nv);C_vn=zeros(Nv,1);
163. %VENTANA SUR
164. A_vs=zeros(Nv,Nv); T_vs=zeros(h,Nv);C_vs=zeros(Nv,1);
165. %ITERACIONES
166. %PARED NORTE
167. ITi_pn=zeros(h,J); ITe_pn=zeros(h,J);
168. %PARED SUR
169. ITi_ps=zeros(h,J); ITe_ps=zeros(h,J);
170. %PARED ESTE
171. ITi_pe=zeros(h,J); ITe_pe=zeros(h,J);
172. %PARED OESTE
173. ITi_po=zeros(h,J); ITe_po=zeros(h,J);
174. %TECHO
175. ITi_tch=zeros(h,J); ITe_tch=zeros(h,J);
176. %PISO
177. ITi_pso=zeros(h,J); ITe_pso=zeros(h,J);
178. %PUERTA

```

```

179. ITi_prt=zeros(h,J);ITe_prt=zeros(h,J);
180. %VENTANA NORTE
181. ITi_vn=zeros(h,J);ITe_vn=zeros(h,J);
182. %VENTANA SUR
183. ITi_vs=zeros(h,J);ITe_vs=zeros(h,J);
184. %ZONA TERMICA
185. ITz=zeros(h,J);
186. %TIEMPO (horas)
187. H=zeros(h,1);
188. %COEFICIENTES DE CONVECCIÓN INTERNO Y EXTERNO
189. %PARED NORTE
190. HIPN=zeros(h,1);HEPN=zeros(h,1);
191. %PARED SUR
192. HIPS=zeros(h,1);HEPS=zeros(h,1);
193. %PARED ESTE
194. HIPE=zeros(h,1);HEPE=zeros(h,1);
195. %PARED OESTE
196. HIPO=zeros(h,1);HEPO=zeros(h,1);
197. %TECHO
198. HITCH=zeros(h,1);HETCH=zeros(h,1);
199. %PISO
200. HIPSO=zeros(h,1);
201. %PUERTA
202. HIPRT=zeros(h,1);HEPRT=zeros(h,1);
203. %VENTANA NORTE
204. HIVN=zeros(h,1);HEVN=zeros(h,1);
205. %VENTANA SUR
206. HIVS=zeros(h,1);HEVS=zeros(h,1);
207. %GANANCIA SOLARES POR RADIACIÓN DE ONDA CORTA
208. %PARED NORTE
209. QSRPN=zeros(h,1);
210. %PARED SUR
211. QSRPS=zeros(h,1);
212. %PARED ESTE
213. QSRPE=zeros(h,1);
214. %PARED OESTE
215. QSRPO=zeros(h,1);
216. %TECHO
217. QSRTCH=zeros(h,1);
218. %PUERTA
219. QSRPRT=zeros(h,1);
220. %VENTANA NORTE
221. QSRVN=zeros(h,1);
222. %VENTANA SUR
223. QSRVS=zeros(h,1);
224. %COEFICIENTES DE GANANCIA SOLARES POR RADIACIÓN DE ONDA LARGA
225. %PARED NORTE
226. HRGNDPN=zeros(h,1);HRSKYPN=zeros(h,1);HRAIRPN=zeros(h,1);
227. %PARED SUR
228. HRGNDPS=zeros(h,1);HRSKYPS=zeros(h,1);HRAIRPS=zeros(h,1);
229. %PARED ESTE
230. HRGNDPE=zeros(h,1);HRSKYPE=zeros(h,1);HRAIRPE=zeros(h,1);
231. %PARED OESTE
232. HRGNDPO=zeros(h,1);HRSKYPO=zeros(h,1);HRAIRPO=zeros(h,1);
233. %TECHO
234. HRGNDTCH=zeros(h,1);HRSKYTCH=zeros(h,1);HRAIRTCH=zeros(h,1);
235. %PUERTA
236. HRGNDPRT=zeros(h,1);HRSKYPRT=zeros(h,1);HRAIRPRT=zeros(h,1);
237. %VENTANA NORTE
238. HRGNDVN=zeros(h,1);HRSKYVN=zeros(h,1);HRAIRVN=zeros(h,1);
239. %VENTANA SUR
240. HRGNDVS=zeros(h,1);HRSKYVS=zeros(h,1);HRAIRVS=zeros(h,1);
241. %VELOCIDAD DEL VIENTO
242. Vz=zeros(h,1);
243. %ERRORES
244. %PARED NORTE
245. Ei_pn=zeros(h,1); %Matriz de errores de la temperatura superficial
    interna entre el modelo de MATLAB y EnergyPlus

```

```

246. Ee_pn=zeros(h,1); %Matriz de errores de la temperatura superficial
    externa entre el modelo de MATLAB y EnergyPlus
247. %PARED SUR
248. Ei_ps=zeros(h,1);Ee_ps=zeros(h,1);
249. %PARED ESTE
250. Ei_pe=zeros(h,1);Ee_pe=zeros(h,1);
251. %PARED OESTE
252. Ei_po=zeros(h,1);Ee_po=zeros(h,1);
253. %TECHO
254. Ei_tch=zeros(h,1);Ee_tch=zeros(h,1);
255. %PISO
256. Ei_pso=zeros(h,1);Ee_pso=zeros(h,1);
257. %PUERTA
258. Ei_prt=zeros(h,1);Ee_prt=zeros(h,1);
259. %VENTANA NORTE
260. Ei_vn=zeros(h,1);Ee_vn=zeros(h,1);
261. %VENTANA SUR
262. Ei_vs=zeros(h,1);Ee_vs=zeros(h,1);
263. %AREA SOLEADA
264. ASPN=zeros(h,1);
265. ASPS=zeros(h,1);
266. ASPE=zeros(h,1);
267. ASPO=zeros(h,1);
268. ASTCH=zeros(h,1);
269. ASPRT=zeros(h,1);
270. ASVN=zeros(h,1);
271. ASVS=zeros(h,1);
272. %ZONA TERMICA
273. TZ=zeros(h,1); % Temperatura de la zona térmica
274. ETZ=zeros(h,1); % Error de la temperatura de la zona térmica
275.
276. %VALORES INICIALES
277. %PARED NORTE
278. HIPN(1,1)=1.5; %Coeficiente de convección interno
279. HEPN(1,1)=2; %Coeficiente de convección externo
280. Tint_pn=20; %Temperatura interna
281. Text_pn=14; %Temperatura externa
282. %PARED SUR
283. HIPS(1,1)=1.5;HEPS(1,1)=2; Tint_ps=20; Text_ps=14;
284. %PARED ESTE
285. HIPE(1,1)=1.5; HEPE(1,1)=2; Tint_pe=20;Text_pe=14;
286. %PARED OESTE
287. HIPO(1,1)=1.5; HEPO(1,1)=2;Tint_po=20;Text_po=14;
288. %TECHO
289. HITCH(1,1)=1.5;HETCH(1,1)=2;Tint_tch=20;Text_tch=14;
290. %PISO
291. HIPSO(1,1)=1.5;Text_pso=18; Tint_pso=14;
292. %PUERTA
293. HIPRT(1,1)=1.5; HEPRT(1,1)=2;Tint_prt=20; Text_prt=14;
294. %VENTANA NORTE
295. HIVN(1,1)=1.5;HEVN(1,1)=2;Tint_vn=14; Text_vn=12;
296. %VENTANA SUR
297. HIVS(1,1)=1.5;HEVS(1,1)=2;Tint_vs=14; Text_vs=12;
298. %TEMPERATURA INICIAL ZONA
299. Tzon=15;
300. TZ(1,1)=Tzon;
301. %TEMPERATURAS INICIALES DE LOS NODOS
302. %PAREDES
303. m=abs((Tint_pn-Text_pn)/(Nprd-1));
304. for j=1:Nprd
305. T_pn(1,j)=Text_pn+(j-1)*m;
306. T_ps(1,j)=Text_pn+(j-1)*m;
307. T_pe(1,j)=Text_pn+(j-1)*m;
308. T_po(1,j)=Text_pn+(j-1)*m;
309. end
310. %TECHO
311. m=abs((Tint_tch-Text_tch)/(Ntch-1));
312. for j=1:Ntch

```

```

313. T_tch(1,j)=Text_tch+(j-1)*m;
314. end
315. %PISO
316. m=abs((Text_pso-Tint_pso)/(Npso-1));
317. for j=1:Npso
318. T_pso(1,j)=Tint_pso+(j-1)*m;
319. end
320. %PUERTA
321. m=abs((Tint_prt-Text_prt)/(Nprt-1));
322. for j=1:Nprt
323. T_prt(1,j)=Text_prt+(j-1)*m;
324. end
325. %VENTANA NORTE
326. m=abs((Tint_vn-Text_vn)/(Nv-1));
327. for j=1:Nv
328. T_vn(1,j)=Text_vn+(j-1)*m;
329. end
330. %VENTANA SUR
331. m=abs((Tint_vs-Text_vs)/(Nv-1));
332. for j=1:Nv
333. T_vs(1,j)=Text_vs+(j-1)*m;
334. end
335.
336. for i=2:h
337. H(i)=i;
338. %GANANCIAS POR RADIACIÓN SOLAR DE ONDA CORTA (Radiacion solar directa y
difusa)
339. %PARED NORTE
340. %Cálculo del area soleada
341. if (acosd(COS_PN(i)))<0 %Angulo de incidencia "acosd(COS_PN(i))"
342. ASPN(i)=0;
343. elseif (acosd(COS_PN(i))>0 && acosd(COS_PN(i))<90);
344. ASPN(i)=APN;
345. elseif (acosd(COS_PN(i))>90;
346. ASPN(i)=0;
347. end
348. QSRPN(i)=ab*(Ib(i)*COS_PN(i)*ASPN(i)/APN+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fgnd);
349. %PARED SUR
350. %Cálculo del area soleada
351. if (acosd(COS_PS(i)))<0
352. ASPS(i)=0;
353. elseif (acosd(COS_PS(i))>0 && acosd(COS_PS(i))<90);
354. ASPS(i)=APS;
355. elseif (acosd(COS_PS(i))>90;
356. ASPS(i)=0;
357. end
358. QSRPS(i)=ab*(Ib(i)*COS_PS(i)*ASPS(i)/APS+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fgnd);
359. %PARED ESTE
360. %Cálculo del area soleada
361. if (acosd(COS_PE(i)))<0
362. ASPE(i)=0;
363. elseif (acosd(COS_PE(i))>0 && acosd(COS_PE(i))<90);
364. ASPE(i)=APE;
365. elseif (acosd(COS_PE(i))>90;
366. ASPE(i)=0;
367. end
368. QSRPE(i)=ab*(Ib(i)*COS_PE(i)*ASPE(i)/APE+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fgnd);
369. %PARED OESTE
370. %Cálculo del area soleada
371. if (acosd(COS_PO(i)))<0
372. ASPO(i)=0;
373. elseif (acosd(COS_PO(i))>0 && acosd(COS_PO(i))<90);
374. ASPO(i)=APO;
375. elseif (acosd(COS_PO(i))>90;
376. ASPO(i)=0;
377. end
378. QSRPO(i)=ab*(Ib(i)*COS_PO(i)*ASPO(i)/APO+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fgnd);
379. %TECHO

```

```

380. %Cálculo del area soleada
381. if (acosd(COS_TCH(i)))<0
382. ASTCH(i)=0;
383. elseif (acosd(COS_TCH(i))>0 && acosd(COS_TCH(i))<90);
384. ASTCH(i)=ATCH;
385. elseif (acosd(COS_TCH(i)))>90;
386. ASTCH(i)=0;
387. end
388. QSRTCH(i)=ab_tch*(Ib(i)*COS_TCH(i)*ASTCH(i)/ATCH+Is(i,1)*Fsky_tch+Ig(i,1)
)*Fgnd_tch);
389. %PUERTA
390. %Cálculo del area soleada
391. if (acosd(COS_PRT(i)))<0
392. ASPRT(i)=0;
393. elseif (acosd(COS_PRT(i))>0 && acosd(COS_PRT(i))<90);
394. ASPRT(i)=APRT;
395. elseif (acosd(COS_PRT(i)))>90;
396. ASPRT(i)=0;
397. end
398. QSRPRT(i)=ab_prt*(Ib(i)*COS_PRT(i)*ASPRT(i)/APRT+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fg
nd);
399. %VENTANA NORTE
400. %Cálculo del area soleada
401. if (acosd(COS_VN(i)))<0
402. ASVN(i)=0;
403. elseif (acosd(COS_VN(i))>0 && acosd(COS_VN(i))<90);
404. ASVN(i)=AVN;
405. elseif (acosd(COS_VN(i)))>90;
406. ASVN(i)=0;
407. end
408. It_vn=(Ib(i)*COS_VN(i)*ASVN(i)/AVN+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fgnd);
409. QSRVN(i)=ab_v*It_vn;
410. %VENTANA SUR
411. %Cálculo del area soleada
412. if (acosd(COS_VS(i)))<0
413. ASVS(i)=0;
414. elseif (acosd(COS_VS(i))>0 && acosd(COS_VS(i))<90);
415. ASVS(i)=AVS;
416. elseif (acosd(COS_VS(i)))>90;
417. ASVS(i)=0;
418. end
419. It_vs=(Ib(i)*COS_VS(i)*ASVS(i)/AVS+Is(i,1)*Fsky+Ig(i,1)*Fgnd);
420. QSRVS(i)=ab_v*It_vs;
421. %CALOR ABSORBIDO POR LA ZONA MEDIANTE LAS VENTANAS
422. QDF=Trans*(COS_VN(i)*ASVN(i)+COS_VS(i)*ASVS(i))*(2*Ib(i)+Is(i,1)+Ig(i,1)
); %Radiacion solar difusa transmitida por la ventana
423. SABIS=ab*(APN+APS+APE+APO)+ab_prt*APRT+ab_tch*ATCH+ab_v*(AVN+AVS);
424. QDT=QDF/SABIS; %Radiacion total solar difusa transmitida por la ventana
a cada componente
425. QDR=ab_pso*2*Trans*(It_vs+It_vn)/APSO; %Radiacion solar directa
transmitida por la ventana hacia el piso
426. %ITERACIONES PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURAS _ Guarda los valores de
427. %temperaturas en cada iteración
428. j=1;
429. %VALORES INICIALES
430. %PARED NORTE
431. ITi_pn(i,j)=Tint_pn; ITe_pn(i,j)=Text_pn;
432. %PARED SUR
433. ITi_ps(i,j)=Tint_ps; ITe_ps(i,j)=Text_ps;
434. %PARED ESTE
435. ITi_pe(i,j)=Tint_pe; ITe_pe(i,j)=Text_pe;
436. %PARED OESTE
437. ITi_po(i,j)=Tint_po; ITe_po(i,j)=Text_po;
438. %TECHO
439. ITi_tch(i,j)=Tint_tch; ITe_tch(i,j)=Text_tch;
440. %PISO
441. ITi_pso(i,j)=Text_pso; ITe_pso(i,j)=Tint_pso;
442. %PUERTA

```

```

443. ITi_prt(i,j)=Tint_prt;   ITe_prt(i,j)=Text_prt;
444. %VENTANA NORTE
445. ITi_vn(i,j)=Tint_vn;    ITe_vn(i,j)=Text_vn;
446. %VENTANA SUR
447. ITi_vs(i,j)=Tint_vs;    ITe_vs(i,j)=Text_vs;
448. %TEMPERATURA ZONA
449. ITz(i,j)=Tzon;
450. it=3;      % Valor cualquiera para comenzar el bucle
451. Delta_Temp=zeros(18,1);
452. while (abs(it)>0.01 && j<10) %Iteraciones
453. j=j+1;    % contador de iteraciones
454. %COEFICIENTES DE RADIACIÓN DE ONDA LARGA
455. %PARED NORTE
456. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
457. HRGNDPN(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_pn+273)^4-(TGND(i)+273)^4)/(Text_pn-
  TGND(i)));
458. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
459. HRSKYPN(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_pn+273)^4-
  (TSKY(i)+273)^4))/(Text_pn-TSKY(i));
460. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
461. HRAIRPN(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_pn+273)^4-
  (TAMB(i)+273)^4))/(Text_pn-TAMB(i));
462. %PARED SUR
463. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
464. HRGNDPS(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_ps+273)^4-(TGND(i)+273)^4)/(Text_ps-
  TGND(i)));
465. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
466. HRSKYPS(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_ps+273)^4-
  (TSKY(i)+273)^4))/(Text_ps-TSKY(i));
467. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
468. HRAIRPS(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_ps+273)^4-
  (TAMB(i)+273)^4))/(Text_ps-TAMB(i));
469. %PARED ESTE
470. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
471. HRGNDPE(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_pe+273)^4-(TGND(i)+273)^4)/(Text_pe-
  TGND(i)));
472. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
473. HRSKYPE(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_pe+273)^4-
  (TSKY(i)+273)^4))/(Text_pe-TSKY(i));
474. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
475. HRAIRPE(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_pe+273)^4-
  (TAMB(i)+273)^4))/(Text_pe-TAMB(i));
476. %PARED OESTE
477. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
478. HRGNDPO(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_po+273)^4-(TGND(i)+273)^4)/(Text_po-
  TGND(i)));
479. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
480. HRSKYPO(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_po+273)^4-
  (TSKY(i)+273)^4))/(Text_po-TSKY(i));
481. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
482. HRAIRPO(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_po+273)^4-
  (TAMB(i)+273)^4))/(Text_po-TAMB(i));
483. %TECHO
484. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
485. HRGNDTCH(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd_tch*((Text_tch+273)^4-
  (TGND(i)+273)^4)/(Text_tch-TGND(i)));
486. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
487. HRSKYTCH(i,1)=(Eps*Tao*Fsky_tch*B_tch*((Text_tch+273)^4-
  (TSKY(i)+273)^4))/(Text_tch-TSKY(i));
488. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
489. HRAIRTCH(i,1)=(Eps*Tao*Fsky_tch*(1-B_tch)*((Text_tch+273)^4-
  (TAMB(i)+273)^4))/(Text_tch-TAMB(i));
490. %PUERTA
491. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
492. HRGNDPRT(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_prt+273)^4-
  (TGND(i)+273)^4)/(Text_prt-TGND(i)));
493. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo

```

```

494. HRSKYPRP(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_prt+273)^4-
    (TSKY(i)+273)^4))/(Text_prt-TSKY(i));
495. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
496. HRAIRPRP(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_prt+273)^4-
    (TAMB(i)+273)^4))/(Text_prt-TAMB(i));
497. %VENTANA NORTE
498. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
499. HRGNDVNP(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_vn+273)^4-(TGND(i)+273)^4)/(Text_vn-
    TGND(i)));
500. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
501. HRSKYVNP(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_vn+273)^4-
    (TSKY(i)+273)^4))/(Text_vn-TSKY(i));
502. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
503. HRAIRVNP(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_vn+273)^4-
    (TAMB(i)+273)^4))/(Text_vn-TAMB(i));
504. %VENTANA SUR
505. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del suelo
506. HRGNDVNS(i,1)=(Eps*Tao*Fgnd*((Text_vs+273)^4-(TGND(i)+273)^4)/(Text_vs-
    TGND(i)));
507. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del cielo
508. HRSKYVNS(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*B*((Text_vs+273)^4-
    (TSKY(i)+273)^4))/(Text_vs-TSKY(i));
509. %Coeficiente de transferencia de calor por radiación del aire
510. HRAIRVNS(i,1)=(Eps*Tao*Fsky*(1-B)*((Text_vs+273)^4-
    (TAMB(i)+273)^4))/(Text_vs-TAMB(i));
511. %COEFICIENTE DE CONVECCIÓN INTERNA
512. %PARED NORTE
513. Pr=0.72;
514. %Coeficiente de convección interno
515. RaL_pn=(gv*(2.5)^3*abs(Tint_pn-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
516. NuL_pn=(0.825+((0.387*RaL_pn^(1/6)))/((1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))))^2;
517. HIPN(i)=NuL_pn*lamb/2.5;
518. %PARED SUR
519. %Coeficiente de convección interno
520. RaL_ps=(gv*(2.5)^3*abs(Tint_ps-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
521. NuL_ps=(0.825+((0.387*RaL_ps^(1/6)))/((1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))))^2;
522. HIPS(i)=NuL_ps*lamb/2.5;
523. %PARED ESTE
524. %Coeficiente de convección interno
525. RaL_pe=(gv*(2.5)^3*abs(Tint_pe-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
526. NuL_pe=(0.825+((0.387*RaL_pe^(1/6)))/((1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))))^2;
527. HIPE(i)=NuL_pe*lamb/2.5;
528. %PARED OESTE
529. %Coeficiente de convección interno
530. RaL_po=(gv*(2.5)^3*abs(Tint_po-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
531. NuL_po=(0.825+((0.387*RaL_po^(1/6)))/((1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))))^2;
532. HIPO(i)=NuL_po*lamb/2.5;
533. %TECHO
534. %Coeficiente de convección interno
535. RaL_tch=(gv*(1.5)^3*abs(Tint_tch-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
536. if (Tint_tch-Tzon)<0
537. if RaL_tch<10^7
538. NuL_tch=0.54*(RaL_tch)^0.25;
539. else
540. NuL_tch=0.15*(RaL_tch)^(1/3);
541. end
542. HITCH(i)=NuL_tch*lamb/1.5;
543. else
544. NuL_tch=0.27*(RaL_tch)^0.25;
545. HITCH(i)=NuL_tch*lamb/1.5;
546. end
547. %PISO
548. %Coeficiente de convección interno
549. RaL_pso=(gv*(1.5)^3*abs(Text_pso-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
550. if (Text_pso-Tzon)>0
551. if RaL_pso<10^7
552. NuL_pso=0.54*(RaL_pso)^0.25;
553. else

```

```

554. NuL_pso=0.15*(RaL_pso)^(1/3);
555. end
556. HIPS0(i)=NuL_pso*lamb/1.5;
557. else
558. NuL_tch=0.27*(RaL_pso)^0.25;
559. HIPS0(i)=NuL_pso*lamb/1.5;
560. end
561. Bii_pso=HIPS0(i)*dx/k_pso;
562. %PUERTA
563. %Coeficiente de convección interno
564. RaL_prt=(gv*(2)^3*abs(Tint_prt-Tzon))/((Tzon+273)*U_air^2);
565. NuL_prt=(0.825+((0.387*RaL_prt^(1/6))/((1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))))^2
;
566. HIPRT(i)=NuL_prt*lamb/2;
567. %VENTANA NORTE
568. %Coeficiente de convección interno
569. Tm_vn=Tzon+0.25*(Tint_vn-Tzon);
570. RaH_vn=(rho_air^2*H_v^3*gv*cp_air*abs(Tint_vn-Tzon))/(Tm_vn*U_air*lamb);
571. Nu_vn=0.56*(RaH_vn)^0.25;
572. HIVN(i)=Nu_vn*(lamb/H_v);
573. %VENTANA SUR
574. %Coeficiente de convección interno
575. Tm_vs=Tzon+0.25*(Tint_vs-Tzon);
576. RaH_vs=(rho_air^2*H_v^3*gv*cp_air*abs(Tint_vs-Tzon))/(Tm_vs*U_air*lamb);
577. Nu_vs=0.56*(RaH_vs)^0.25;
578. HIVS(i)=Nu_vs*(lamb/H_v);
579. %COEFICIENTE DE CONVECCIÓN EXTERNA
580. %PARED NORTE
581. if PRTC(i,1)==0
582. %Velocidad del viento local
583. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
584. %Coeficiente de convección natural externo
585. hn=(1.81*(abs(Text_pn-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
586. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
587. %Forzado para una superficie completamente lisa
588. if acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90; %Sotavento
589. a=3.55; %Coeficiente de la dirección del viento
590. b=0.617; %Coeficiente de la dirección del viento
591. else %Barlovento
592. a=3.26; %Coeficiente de la dirección del viento
593. b=0.89; %Coeficiente de la dirección del viento
594. end
595. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
596. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
597. %material
598. hc=hn+Rf*(hc_g-hn);
599. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
600. % incidente en las paredes
601. HEPN(i,1)=hc;
602. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
603. HEPN(i,1)=600;
604. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
605. HEPN(i,1)=650;
606. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
607. HEPN(i,1)=1000;
608. end
609. Bii_pn=HIPN(i)*dx/k_prd; % Número de Biot interno
610. Bie_pn=HEPN(i)*dx/k_prd; % Número de Biot interno
611. Bradgnd_pn=HRGNDPN(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación sel
suelo
612. Bradsky_pn=HRSKYPN(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación del
cielo
613. Bradair_pn=HRAIRPN(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación del
aire
614. %PARED SUR
615. if PRTC(i,1)==0
616. %Velocidad del viento local
617. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);

```

```

618. %Coeficiente de convección natural externo
619. hn=(1.81*(abs(Text_ps-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
620. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
621. %Forzado para una superficie completamente lisa
622. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Barlovento
623. a=3.26; %Coeficiente de la dirección del viento
624. b=0.89; %Coeficiente de la dirección del viento
625. else %Sotavento
626. a=3.55; %Coeficiente de la dirección del viento
627. b=0.617; %Coeficiente de la dirección del viento
628. end
629. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
630. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
631. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
632. %material
633. hc=hn+Rf*(hc_g-hn);
634. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
635. % incidente en las paredes
636. HEPS(i,1)=hc;
637. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
638. HEPS(i,1)=600;
639. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
640. HEPS(i,1)=650;
641. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
642. HEPS(i,1)=1000;
643. end
644. Bii_ps=HIPS(i)*dx/k_prd; % Número de Biot interno
645. Bie_ps=HEPS(i)*dx/k_prd; % Número de Biot interno
646. Bradgnd_ps=HRGNDPS(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación sel
suelo
647. Bradsky_ps=HRSKYPS(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación del
cielo
648. Bradair_ps=HRAIRPS(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación del
aire
649. %PARED ESTE
650. if PRTC(i,1)==0
651. %Velocidad del viento local
652. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
653. %Coeficiente de convección natural externo
654. hn=(1.81*(abs(Text_pe-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
655. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
656. %Forzado para una superficie completamente lisa
657. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Sotavento
658. a=3.55; %Coeficiente de la dirección del viento
659. b=0.617; %Coeficiente de la dirección del viento
660. else %Barlovento
661. a=3.26; %Coeficiente de la dirección del viento
662. b=0.89; %Coeficiente de la dirección del viento
663. end
664. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
665. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
666. %material
667. hc=hn+Rf*(hc_g-hn);
668. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
669. % incidente en las paredes
670. HEPE(i,1)=hc;
671. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
672. HEPE(i,1)=600;
673. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
674. HEPE(i,1)=650;
675. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
676. HEPE(i,1)=1000;
677. end
678. Bii_pe=HIPE(i)*dx/k_prd; % Número de Biot interno
679. Bie_pe=HEPE(i)*dx/k_prd; % Número de Biot interno
680. Bradgnd_pe=HRGNDPE(i)*dx/k_prd; % Número de Biot de radiación sel
suelo

```

```

681. Bradsky_pe=HRSKYPE(i)*dx/k_prd;      % Número de Biot de radiación del
cielo
682. Bradair_pe=HRAIRPE(i)*dx/k_prd;      % Número de Biot de radiación del
aire
683. %PARED OESTE
684. if PRTC(i,1)==0
685. %Velocidad del viento local
686. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
687. %Coeficiente de convección natural externo
688. hn=(1.81*(abs(Text_po-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
689. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
690. %Forzado para una superficie completamente lisa
691. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Sotavento
692. a=3.55;          %Coeficiente de la dirección del viento
693. b=0.617;        %Coeficiente de la dirección del viento
694. else %Barlovento
695. a=3.26;          %Coeficiente de la dirección del viento
696. b=0.89;         %Coeficiente de la dirección del viento
697. end
698. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
699. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
700. %material
701. hc=hn+Rf*(hc_g-hn);
702. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
703. % incidente en las paredes
704. HEPO(i,1)=hc;
705. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
706. HEPO(i,1)=600;
707. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
708. HEPO(i,1)=650;
709. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
710. HEPO(i,1)=1000;
711. end
712. Bii_po=HIPO(i)*dx/k_prd;              % Número de Biot interno
713. Bie_po=HEPO(i)*dx/k_prd;              % Número de Biot interno
714. Bradgnd_po=HRGNDPO(i)*dx/k_prd;      % Número de Biot de radiación sel
suelo
715. Bradsky_po=HRSKYPO(i)*dx/k_prd;      % Número de Biot de radiación del
cielo
716. Bradair_po=HRAIRPO(i)*dx/k_prd;      % Número de Biot de radiación del
aire
717. %TECHO
718. if PRTC(i,1)==0
719. %Velocidad del viento local
720. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
721. %Coeficiente de convección natural externo
722. if (Text_tch-Tzon)>0
723. hn=(9.482*(abs(Text_tch-Tzon))^(1/3))/(7.283-1);
724. else
725. hn=(1.81*(abs(Text_tch-Tzon))^(1/3))/(1.382+1);
726. end
727. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
728. %Forzado para una superficie completamente lisa
729. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Sotavento
730. a=3.55;          %Coeficiente de la dirección del viento
731. b=0.617;        %Coeficiente de la dirección del viento
732. else %Barlovento
733. a=3.26;          %Coeficiente de la dirección del viento
734. b=0.89;         %Coeficiente de la dirección del viento
735. end
736. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
737. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
738. %material
739. hc=hn+Rf*(hc_g-hn);
740. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
741. % incidente en las paredes
742. HETCH(i,1)=hc;
743. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)

```

```

744. HETCH(i,1)=600;
745. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
746. HETCH(i,1)=650;
747. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
748. HETCH(i,1)=1000;
749. end
750. Bii_tch=HITCH(i)*dx/k_tch; % Número de Biot interno
751. Bie_tch=HETCH(i)*dx/k_tch; % Número de Biot interno
752. Bradgnd_tch=HRGNDTCH(i)*dx/k_tch; % Número de Biot de radiación sel
    suelo
753. Bradsky_tch=HRSKYTCH(i)*dx/k_tch; % Número de Biot de radiación del
    cielo
754. Bradair_tch=HRAIRTCH(i)*dx/k_tch; % Número de Biot de radiación del
    aire
755. %PUERTA
756. if PRTC(i,1)==0
757. %Velocidad del viento local
758. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
759. %Coeficiente de convección natural externo
760. hn=(1.81*(abs(Text_prt-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
761. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
762. %Forzado para una superficie completamente lisa
763. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Barlovento
764. a=3.26; %Coeficiente de la dirección del viento
765. b=0.89; %Coeficiente de la dirección del viento
766. else %Sotavento
767. a=3.55; %Coeficiente de la dirección del viento
768. b=0.617; %Coeficiente de la dirección del viento
769. end
770. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
771. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
772. %material
773. hc=hn+Rf*(hc_g-hn);
774. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
775. % incidente en las paredes
776. HEPRT(i,1)=hc;
777. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
778. HEPRT(i,1)=600;
779. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
780. HEPRT(i,1)=650;
781. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
782. HEPRT(i,1)=1000;
783. end
784. Bii_prt=HIPRT(i)*dx/k_prt; % Número de Biot interno
785. Bie_prt=HEPRT(i)*dx/k_prt; % Número de Biot interno
786. Bradgnd_prt=HRGNPRT(i)*dx/k_prt; % Número de Biot de radiación sel
    suelo
787. Bradsky_prt=HRSKYPRT(i)*dx/k_prt; % Número de Biot de radiación del
    cielo
788. Bradair_prt=HRAIRPRT(i)*dx/k_prt; % Número de Biot de radiación del
    aire
789. %VENTANA NORTE
790. if PRTC(i,1)==0
791. %Velocidad del viento local
792. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
793. %Coeficiente de convección natural externo
794. hn=(1.81*(abs(Text_vn-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
795. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
796. %Forzado para una superficie completamente lisa
797. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Sotavento
798. a=3.55; %Coeficiente de la dirección del viento
799. b=0.617; %Coeficiente de la dirección del viento
800. else %Barlovento
801. a=3.26; %Coeficiente de la dirección del viento
802. b=0.89; %Coeficiente de la dirección del viento
803. end
804. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
805. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del

```

```

806. %material
807. hc=hc_g;
808. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
809. % incidente en las paredes
810. HEVN(i,1)=hc;
811. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
812. HEVN(i,1)=600;
813. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
814. HEVN(i,1)=650;
815. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
816. HEVN(i,1)=1000;
817. end
818. Bii_vn=HIVN(i)*dxv/k_v; % Número de Biot interno
819. Bie_vn=HEVN(i)*dxv/k_v; % Número de Biot interno
820. Bradgnd_vn=1*HRGNDVN(i)*dxv/k_v; % Número de Biot de radiación sel
suelo
821. Bradsky_vn=1*HRSKYVN(i)*dxv/k_v; % Número de Biot de radiación del
cielo
822. Bradair_vn=1*HRAIRVN(i)*dxv/k_v; % Número de Biot de radiación del
aire
823. %VENTANA SUR
824. if PRTC(i,1)==0
825. %Velocidad del viento local
826. Vz=Vm(i,1)*((dm/zm)^am)*((z/d)^al);
827. %Coeficiente de convección natural externo
828. hn=(1.81*(abs(Text_vs-TAMB(i,1)))^(1/3))/(1.382+0);
829. %Coeficiente de convección total sobre la pared externa - Natural y
830. %Forzado para una superficién completamente lisa
831. if (acosd(COS_TCH(i))>180 && acosd(COS_TCH(i))<90); %Barlovento
832. a=3.26; %Coeficiente de la dirección del viento
833. b=0.89; %Coeficiente de la dirección del viento
834. else %Sotavento
835. a=3.55; %Coeficiente de la dirección del viento
836. b=0.617; %Coeficiente de la dirección del viento
837. end
838. hc_g=sqrt((hn^2)+(a*Vz^b)^2);
839. %Coeficiente de convección modificado de acorde a la rugosidad del
840. %material
841. hc=hc_g;
842. % Coeficiente de convección externo en función de la precipitación
843. % incidente en las paredes
844. HEVS(i,1)=hc;
845. elseif (PRTC(i,1)>0.0001 && PRTC(i,1)<0.00099)
846. HEVS(i,1)=600;
847. elseif (PRTC(i,1)>0.001 && PRTC(i,1)<0.0015)
848. HEVS(i,1)=650;
849. elseif (PRTC(i,1)>0.0015)
850. HEVS(i,1)=1000;
851. end
852. Bii_vs=HIVS(i)*dxv/k_v; % Número de Biot interno
853. Bie_vs=HEVS(i)*dxv/k_v; % Número de Biot interno
854. Bradgnd_vs=1*HRGNDVS(i)*dxv/k_v; % Número de Biot de radiación del
suelo
855. Bradsky_vs=1*HRSKYVS(i)*dxv/k_v; % Número de Biot de radiación del
cielo
856. Bradair_vs=1*HRAIRVS(i)*dxv/k_v; % Número de Biot de radiación del
aire
857. %CONDUCCIÓN EN LAS PAREDES
858. %PARED NORTE
859. %Matriz de temperatura nodales
860. for n=1:Nprd
861. if n==1;
862. A_pn(n,n)=1+2*Bii_pn*Fo_prd+2*Fo_prd; A_pn(n,n+1)=-2*Fo_prd;
863. C_pn(n)=2*Bii_pn*Fo_prd*Tzon+T_pn(i-1,n)+QDT*ab*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx);
864. elseif (n>1 && n<Nprd);
865. A_pn(n,n-1)=-Fo_prd; A_pn(n,n)=1+2*Fo_prd; A_pn(n,n+1)=-Fo_prd;
866. C_pn(n)=T_pn(i-1,n);
867. elseif n==Nprd

```

```

868. A_pn(n,n-1)=-2*Fo_prd;
A_pn(n,n)=1+2*Fo_prd*(Bie_pn+Bradgnd_pn+Bradsky_pn+Bradair_pn+1);
869. C_pn(n)=QSRPN(i)*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx)+2*Fo_prd*(Bie_pn*TAMB(i)+Bradgnd_pn*TGND(i)+Bradsky_pn*TSKY(i)+Bradair_pn*TAMB(i))+T_pn(i-1,n);
870. end
871. end
872. %Cálculo de temperaturas nodales
873. T_pn(i,:)=(inv(A_pn))*C_pn;
874. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
875. Tint_pn=T_pn(i,1);
876. Text_pn=T_pn(i,Nprd);
877. %PARED SUR
878. %Matriz de temperatura nodales
879. for n=1:Nprd
880. if n==1;
881. A_ps(n,n)=1+2*Bii_ps*Fo_prd+2*Fo_prd; A_ps(n,n+1)=-2*Fo_prd;
882. C_ps(n)=2*Bii_ps*Fo_prd*Tzon+T_ps(i-1,n)+QDT*ab*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx);
883. elseif (n>1 && n<Nprd);
884. A_ps(n,n-1)=-Fo_prd; A_ps(n,n)=1+2*Fo_prd; A_ps(n,n+1)=-Fo_prd;
885. C_ps(n)=T_ps(i-1,n);
886. elseif n==Nprd
887. A_ps(n,n-1)=-2*Fo_prd;
A_ps(n,n)=1+2*Fo_prd*(Bie_ps+Bradgnd_ps+Bradsky_ps+Bradair_ps+1);
888. C_ps(n)=QSRPS(i)*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx)+2*Fo_prd*(Bie_ps*TAMB(i)+Bradgnd_ps*TGND(i)+Bradsky_ps*TSKY(i)+Bradair_ps*TAMB(i))+T_ps(i-1,n);
889. end
890. end
891. %Cálculo de temperaturas nodales
892. T_ps(i,:)=(inv(A_ps))*C_ps;
893. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
894. Tint_ps=T_ps(i,1);
895. Text_ps=T_ps(i,Nprd);
896. %PARED ESTE
897. %Matriz de temperatura nodales
898. for n=1:Nprd
899. if n==1;
900. A_pe(n,n)=1+2*Bii_pe*Fo_prd+2*Fo_prd; A_pe(n,n+1)=-2*Fo_prd;
901. C_pe(n)=2*Bii_pe*Fo_prd*Tzon+T_pe(i-1,n)+QDT*ab*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx);
902. elseif (n>1 && n<Nprd);
903. A_pe(n,n-1)=-Fo_prd; A_pe(n,n)=1+2*Fo_prd; A_pe(n,n+1)=-Fo_prd;
904. C_pe(n)=T_pe(i-1,n);
905. elseif n==Nprd
906. A_pe(n,n-1)=-2*Fo_prd;
A_pe(n,n)=1+2*Fo_prd*(Bie_pe+Bradgnd_pe+Bradsky_pe+Bradair_pe+1);
907. C_pe(n)=QSRPE(i)*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx)+2*Fo_prd*(Bie_pe*TAMB(i)+Bradgnd_pe*TGND(i)+Bradsky_pe*TSKY(i)+Bradair_pe*TAMB(i))+T_pe(i-1,n);
908. end
909. end
910. %Cálculo de temperaturas nodales
911. T_pe(i,:)=(inv(A_pe))*C_pe;
912. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
913. Tint_pe=T_pe(i,1);
914. Text_pe=T_pe(i,Nprd);
915. %PARED OESTE
916. %Matriz de temperatura nodales
917. for n=1:Nprd
918. if n==1;
919. A_po(n,n)=1+2*Bii_po*Fo_prd+2*Fo_prd; A_po(n,n+1)=-2*Fo_prd;
920. C_po(n)=2*Bii_po*Fo_prd*Tzon+T_po(i-1,n)+QDT*ab*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx);
921. elseif (n>1 && n<Nprd);
922. A_po(n,n-1)=-Fo_prd; A_po(n,n)=1+2*Fo_prd; A_po(n,n+1)=-Fo_prd;
923. C_po(n)=T_po(i-1,n);
924. elseif n==Nprd
925. A_po(n,n-1)=-2*Fo_prd;
A_po(n,n)=1+2*Fo_prd*(Bie_po+Bradgnd_po+Bradsky_po+Bradair_po+1);
926. C_po(n)=QSRPO(i)*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx)+2*Fo_prd*(Bie_po*TAMB(i)+Bradgnd_po*TGND(i)+Bradsky_po*TSKY(i)+Bradair_po*TAMB(i))+T_po(i-1,n);
927. end

```

```

928. end
929. %Cálculo de temperaturas nodales
930. T_po(i,:)=(inv(A_po))*C_po;
931. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
932. Tint_po=T_po(i,1);
933. Text_po=T_po(i,Nprd);
934. %TECHO
935. %Matriz de temperatura nodales
936. for n=1:Ntch
937. if n==1;
938. A_tch(n,n)=1+2*Bii_tch*Fo_tch+2*Fo_tch; A_tch(n,n+1)=-2*Fo_tch;
939. C_tch(n)=2*Bii_tch*Fo_tch*Tzon+T_tch(i-
940. 1,n)+QDT*ab_tch*2*dt*alp_prd/(k_prd*dx);
941. elseif (n>1 && n<Ntch);
942. A_tch(n,n-1)=-Fo_tch; A_tch(n,n)=1+2*Fo_tch; A_tch(n,n+1)=-Fo_tch;
943. C_tch(n)=T_tch(i-1,n);
944. elseif n==Ntch
945. A_tch(n,n-1)=-2*Fo_tch;
946. A_tch(n,n)=1+2*Fo_tch*(Bie_tch+Bradgnd_tch+Bradsky_tch+Bradair_tch+1);
947. C_tch(n)=QSRRTCH(i)*2*dt*alp_tch/(k_tch*dx)+2*Fo_tch*(Bie_tch*TAMB(i)+Bra
948. dgnd_tch*TGND(i)+Bradsky_tch*TSKY(i)+Bradair_tch*TAMB(i))+T_tch(i-1,n);
949. end
950. end
951. %Cálculo de temperaturas nodales
952. T_tch(i,:)=(inv(A_tch))*C_tch;
953. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
954. Tint_tch=T_tch(i,1);
955. Text_tch=T_tch(i,Ntch);
956. %PISO
957. %Matriz de temperatura nodales
958. for n=1:Npso
959. if n==1; %Matriz de temperatura de los nodos
960. A_pso(n,n)=1+2*Bii_pso*Fo_pso+2*Fo_pso; A_pso(n,n+1)=-2*Fo_pso;
961. C_pso(n)=2*Bii_pso*Fo_pso*Tzon+T_pso(i-
962. 1,n)+(QDT*ab_pso+QDR)*2*dt*alp_pso/(k_pso*dx);
963. elseif (n>1 && n<Npso);
964. A_pso(n,n-1)=-Fo_pso; A_pso(n,n)=1+2*Fo_pso; A_pso(n,n+1)=-Fo_pso;
965. C_pso(n)=T_pso(i-1,n);
966. elseif n==Npso
967. A_pso(n,n-1)=0; A_pso(n,n)=1;
968. C_pso(n)=T_pso(i-1,n);
969. end
970. end
971. %Cálculo de temperaturas nodales
972. T_pso(i,:)=(inv(A_pso))*C_pso;
973. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
974. Text_pso=T_pso(i,1);
975. Tint_pso=T_pso(i,Npso);
976. %PUERTA
977. %Matriz de temperatura nodales
978. for n=1:Nprt
979. if n==1;
980. A_prt(n,n)=1+2*Bii_prt*Fo_prt+2*Fo_prt; A_prt(n,n+1)=-2*Fo_prt;
981. C_prt(n)=2*Bii_prt*Fo_prt*Tzon+T_prt(i-
982. 1,n)+QDT*ab_prt*2*dt*alp_prt/(k_prt*dx);
983. elseif (n>1 && n<Nprt);
984. A_prt(n,n-1)=-Fo_prt; A_prt(n,n)=1+2*Fo_prt; A_prt(n,n+1)=-Fo_prt;
985. C_prt(n)=T_prt(i-1,n);
986. elseif n==Nprt
987. A_prt(n,n-1)=-2*Fo_prt;
988. A_prt(n,n)=1+2*Fo_prt*(Bie_prt+Bradgnd_prt+Bradsky_prt+Bradair_prt+1);
989. C_prt(n)=QSRPRT(i)*2*dt*alp_prt/(k_prt*dx)+2*Fo_prt*(Bie_prt*TAMB(i)+Bra
990. dgnd_prt*TGND(i)+Bradsky_prt*TSKY(i)+Bradair_prt*TAMB(i))+T_prt(i-1,n);
991. end
992. end
993. %Cálculo de temperaturas nodales
994. T_prt(i,:)=(inv(A_prt))*C_prt;
995. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración

```

```

990. Text_prt=T_prt(i,Nprt);
991. Tint_prt=T_prt(i,1);
992. %VENTANA NORTE
993. %Matriz de temperatura nodales
994. for n=1:Nv
995. if n==1;
996. A_vn(n,n)=1+2*Bii_vn*Fo_v+2*Fo_v; A_vn(n,n+1)=-2*Fo_v;
997. C_vn(n)=2*Bii_vn*Fo_v*Tzon+T_vn(i-1,n)+QDT*ab_v*2*dt*alp_v/(k_v*dxv);
998. elseif (n>1 && n<Nv);
999. A_vn(n,n-1)=-Fo_v; A_vn(n,n)=1+2*Fo_v; A_vn(n,n+1)=-Fo_v;
1000. C_vn(n)=T_vn(i-1,n);
1001. elseif n==Nv
1002. A_vn(n,n-1)=-2*Fo_v;
A_vn(n,n)=1+2*Fo_v*(Bie_vn+Bradgnd_vn+Bradsky_vn+Bradair_vn+1);
1003. C_vn(n)=QSRVN(i)*2*dt*alp_v/(k_v*dxv)+2*Fo_v*(Bie_vn*TAMB(i)+Bradgnd_vn*
TGND(i)+Bradsky_vn*TSKY(i)+Bradair_vn*TAMB(i))+T_vn(i-1,n);
1004. end
1005. end
1006. %Cálculo de temperaturas nodales
1007. T_vn(i,:)=(inv(A_vn))*C_vn;
1008. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
1009. Text_vn=T_vn(i,Nv);
1010. Tint_vn=T_vn(i,1);
1011. %VENTANA SUR
1012. %Matriz de temperatura nodales
1013. for n=1:Nv
1014. if n==1;
1015. A_vs(n,n)=1+2*Bii_vs*Fo_v+2*Fo_v; A_vs(n,n+1)=-2*Fo_v;
1016. C_vs(n)=2*Bii_vs*Fo_v*Tzon+T_vs(i-1,n)+QDT*ab_v*2*dt*alp_v/(k_v*dxv);
1017. elseif (n>1 && n<Nv);
1018. A_vs(n,n-1)=-Fo_v; A_vs(n,n)=1+2*Fo_v; A_vs(n,n+1)=-Fo_v;
1019. C_vs(n)=T_vs(i-1,n);
1020. elseif n==Nv
1021. A_vs(n,n-1)=-2*Fo_v;
A_vs(n,n)=1+2*Fo_v*(Bie_vs+Bradgnd_vs+Bradsky_vs+Bradair_vs+1);
1022. C_vs(n)=QSRVS(i)*2*dt*alp_v/(k_v*dxv)+2*Fo_v*(Bie_vs*TAMB(i)+Bradgnd_vs*
TGND(i)+Bradsky_vs*TSKY(i)+Bradair_vs*TAMB(i))+T_vs(i-1,n);
1023. end
1024. end
1025. %Cálculo de temperaturas nodales
1026. T_vs(i,:)=(inv(A_vs))*C_vs;
1027. %Asignación de valores de temperatura para cada iteración
1028. Text_vs=T_vs(i,Nv);
1029. Tint_vs=T_vs(i,1);
1030. %ZONA TERMICA
1031. SHAT=HIVN(i-1,1)*AVN*T_vn(i-1,1)+HIVS(i-1,1)*AVS*T_vs(i-1,1)+HIPO(i-
1,1)*APO*T_po(i-1,1)+HIPN(i-1,1)*APN*T_pn(i-1,1)+HIPS(i-1,1)*APS*T_ps(i-
1,1)+HIPRT(i-1,1)*APRT*T_prt(i-1,1)+HIPE(i-1,1)*APE*T_pe(i-1,1)+HIPSO(i-
1,1)*APSO*T_pso(i-1,1)+HITCH(i-1,1)*ATCH*T_tch(i-1,1);
1032. SHA=HIVN(i-1,1)*AVN+HIVS(i-1,1)*AVS+HIPO(i-1,1)*APO+HIPN(i-
1,1)*APN+HIPS(i-1,1)*APS+HIPRT(i-1,1)*APRT+HIPE(i-1,1)*APE+HIPSO(i-
1,1)*APSO+HITCH(i-1,1)*ATCH;
1033. Tzon=((Cz*TZ(i-1,1)/dt)+SHAT+INF*cp_air*TAMB(i-
1,1)/dt)/((Cz/dt)+SHA+INF*cp_air/dt);
1034. TZ(i,1)=Tzon;
1035. %ALMACENAMIENTO DE LAS TEMPERATURAS EN CADA ITERACIÓN
1036. %PARED NORTE
1037. ITi_pn(i,j)=Tint_pn; ITe_pn(i,j)=Text_pn;
1038. %PARED SUR
1039. ITi_ps(i,j)=Tint_ps; ITe_ps(i,j)=Text_ps;
1040. %PARED ESTE
1041. ITi_pe(i,j)=Tint_pe; ITe_pe(i,j)=Text_pe;
1042. %PARED OESTE
1043. ITi_po(i,j)=Tint_po; ITe_po(i,j)=Text_po;
1044. %TECHO
1045. ITi_tch(i,j)=Tint_tch; ITe_tch(i,j)=Text_tch;
1046. %PISO
1047. ITi_pso(i,j)=Text_pso; ITe_pso(i,j)=Tint_pso;

```

```

1048. %PUERTA
1049. ITi_prt(i,j)=Tint_prt;   ITe_prt(i,j)=Text_prt;
1050. %VENTANA NORTE
1051. ITi_vn(i,j)=Tint_vn;   ITe_vn(i,j)=Text_vn;
1052. %VENTANA SUR
1053. ITi_vs(i,j)=Tint_vs;   ITe_vs(i,j)=Text_vs;
1054. %TEMPERATURA ZONA
1055. ITz(i,j)=Tzon;
1056. %DIFERENCIA DE TEMPERATURAS EN CADA ITERACIÓN
1057. Delta_Temp(1)=abs(ITi_pn(i,j)-ITi_pn(i,j-1));
1058. Delta_Temp(2)=abs(ITi_ps(i,j)-ITi_ps(i,j-1));
1059. Delta_Temp(3)=abs(ITi_pe(i,j)-ITi_pe(i,j-1));
1060. Delta_Temp(4)=abs(ITi_po(i,j)-ITi_po(i,j-1));
1061. Delta_Temp(5)=abs(ITi_pso(i,j)-ITi_pso(i,j-1));
1062. Delta_Temp(6)=abs(ITi_tch(i,j)-ITi_tch(i,j-1));
1063. Delta_Temp(7)=abs(ITi_vn(i,j)-ITi_vn(i,j-1));
1064. Delta_Temp(8)=abs(ITi_vs(i,j)-ITi_vs(i,j-1));
1065. Delta_Temp(9)=abs(ITi_prt(i,j)-ITi_prt(i,j-1));
1066. Delta_Temp(10)=abs(ITe_pn(i,j)-ITe_pn(i,j-1));
1067. Delta_Temp(11)=abs(ITe_ps(i,j)-ITe_ps(i,j-1));
1068. Delta_Temp(12)=abs(ITe_pe(i,j)-ITe_pe(i,j-1));
1069. Delta_Temp(13)=abs(ITe_po(i,j)-ITe_po(i,j-1));
1070. Delta_Temp(14)=abs(ITe_po(i,j)-ITe_po(i,j-1));
1071. Delta_Temp(15)=abs(ITe_tch(i,j)-ITe_tch(i,j-1));
1072. Delta_Temp(16)=abs(ITe_vn(i,j)-ITe_vn(i,j-1));
1073. Delta_Temp(17)=abs(ITe_vs(i,j)-ITe_vs(i,j-1));
1074. Delta_Temp(18)=abs(ITe_prt(i,j)-ITe_prt(i,j-1));
1075. it=max(Delta_Temp);
1076. end
1077.
1078. %CÁLCULO DE ERRORES CON RESPECTO A ENERGYPLUS
1079. %PARED NORTE
1080. Ei_pn(i,1)=abs((T_pn(i,1)-TIPN_EP(i,1))/TIPN_EP(i,1))*100;
1081. Ee_pn(i,1)=abs((T_pn(i,Nprd)-TEPN_EP(i,1))/TEPN_EP(i,1))*100;
1082. %PARED SUR
1083. Ei_ps(i,1)=abs((T_ps(i,1)-TIPS_EP(i,1))/TIPS_EP(i,1))*100;
1084. Ee_ps(i,1)=abs((T_ps(i,Nprd)-TEPS_EP(i,1))/TEPS_EP(i,1))*100;
1085. %PARED ESTE
1086. Ei_pe(i,1)=abs((T_pe(i,1)-TIPE_EP(i,1))/TIPE_EP(i,1))*100;
1087. Ee_pe(i,1)=abs((T_pe(i,Nprd)-TEPE_EP(i,1))/TEPE_EP(i,1))*100;
1088. %PARED OESTE
1089. Ei_po(i,1)=abs((T_po(i,1)-TIPO_EP(i,1))/TIPO_EP(i,1))*100;
1090. Ee_po(i,1)=abs((T_po(i,Nprd)-TEPO_EP(i,1))/TEPO_EP(i,1))*100;
1091. %TECHO
1092. Ei_tch(i,1)=abs((T_tch(i,1)-TITCH_EP(i,1))/TITCH_EP(i,1))*100;
1093. Ee_tch(i,1)=abs((T_tch(i,Ntch)-TETCH_EP(i,1))/TETCH_EP(i,1))*100;
1094. %PISO
1095. Ei_pso(i,1)=abs((T_pso(i,1)-TIPSO_EP(i,1))/TIPSO_EP(i,1))*100;
1096. Ee_pso(i,1)=abs((T_pso(i,Npso)-TEPSO_EP(i,1))/TEPSO_EP(i,1))*100;
1097. %PUERTA
1098. Ei_prt(i,1)=abs((T_prt(i,1)-TIPRT_EP(i,1))/TIPRT_EP(i,1))*100;
1099. Ee_prt(i,1)=abs((T_prt(i,Nprt)-TEPRT_EP(i,1))/TEPRT_EP(i,1))*100;
1100. %VENTANA NORTE
1101. Ei_vn(i,1)=abs((T_vn(i,1)-TIVN_EP(i,1))/TIVN_EP(i,1))*100;
1102. Ee_vn(i,1)=abs((T_vn(i,Nv)-TEVN_EP(i,1))/TEVN_EP(i,1))*100;
1103. %VENTANA SUR
1104. Ei_vs(i,1)=abs((T_vs(i,1)-TIVS_EP(i,1))/TIVS_EP(i,1))*100;
1105. Ee_vs(i,1)=abs((T_vs(i,Nv)-TEVS_EP(i,1))/TEVS_EP(i,1))*100;
1106. %ZONA TERMICA
1107. ETZ(i,1)=abs((TZ(i,1)-TZ_EP(i,1))/TZ_EP(i,1))*100;
1108. end
1109. toc
1110.
1111. %EXPRESAR RESULTADOS
1112. % Error promedio total
1113. E_TZ=sum(ETZ)/h
1114. EI_PN=sum(Ei_pn)/h
1115. EE_PN=sum(Ee_pn)/h

```

```

1116. EI_PS=sum(Ei_ps)/h
1117. EE_PS=sum(Ee_ps)/h
1118. EI_PE=sum(Ei_pe)/h
1119. EE_PE=sum(Ee_pe)/h
1120. EI_PO=sum(Ei_po)/h
1121. EE_PO=sum(Ee_po)/h
1122. EI_PSO=sum(Ei_pso)/h
1123. EE_PSO=sum(Ee_pso)/h
1124. EI_TCH=sum(Ei_tch)/h
1125. EE_TCH=sum(Ee_tch)/h
1126. EI_PRT=sum(Ei_prt)/h
1127. EE_PRT=sum(Ee_prt)/h
1128. EI_VN=sum(Ei_vn)/h
1129. EE_VN=sum(Ee_vn)/h
1130. EI_VS=sum(Ei_vs)/h
1131. EE_VS=sum(Ee_vs)/h
1132.
1133. % GRAFICAS
1134. %ZONA TERMICA
1135. figure(1)
1136. T1=TZ_EP(1:h,1);
1137. T2=TAMB(1:h,1);
1138. hold on
1139. plot(H,TZ,'-b+', 'markersize',2);
1140. plot(H,T1,'-r*', 'markersize',3);
1141. plot(H,T2,'-gx', 'markersize',3);
1142. hold off
1143. grid on;
1144. legend('Modelo-MATLAB', 'EnergyPlus', 'Temperatura-ambiente')
1145. xlabel('t(horas)');
1146. ylabel('T(°C)');
1147.
1148. %ERRORES TEMPERATURAS SUPERFICIALES
1149. E_Total=zeros(10,2);
1150. E_Total(1,1)=EI_PN;E_Total(2,1)=EI_PS;E_Total(3,1)=EI_PE;E_Total(4,1)=EI
_PO;E_Total(5,1)=EI_PSO;E_Total(6,1)=EI_TCH;E_Total(7,1)=EI_PRT;
1151. E_Total(8,1)=EI_VN;E_Total(9,1)=EI_VS;E_Total(10,1)=E_TZ;E_Total(1,2)=EE
_PN;E_Total(2,2)=EE_PS;E_Total(3,2)=EE_PE;E_Total(4,2)=EE_PO;
1152. E_Total(5,2)=EE_PSO;E_Total(6,2)=EE_TCH;E_Total(7,2)=EE_PRT;E_Total(8,2)
=EE_VN;E_Total(9,2)=EE_VS;E_Total(10,2)=0;
1153. figure(2)
1154. Componentes={'Pared Norte','Pared Sur','Pared Este','Pared
Oeste','Piso','Techo','Puerta','Ventana Norte','Ventana Sur','Zona
térmica'};
1155. BET=bar(E_Total);
1156. set(gca,'XTickLabel',Componentes);
1157. grid on;
1158. legend('Error Temperatura Superficial Interna','Error Temperatura
Superficial Externa')
1159. title('Error de la Temperatura Superficial en los Componentes (%)');
1160. ylabel('Error(%)');
1161.
1162. %GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS
1163. fr1=zeros(35,1);
1164. fr2=zeros(35,1);
1165. for i=4:35
1166. fr1(i-3)=i;
1167. end
1168. for i=1:h
1169. if (TZ(i))<4
1170. fr2(1,1)=fr2(1,1)+1;
1171. elseif (TZ(i))>4 && (TZ(i))<=5;
1172. fr2(2,1)=fr2(2,1)+1;
1173. elseif (TZ(i))>5 && (TZ(i))<=6;
1174. fr2(3,1)=fr2(3,1)+1;
1175. elseif (TZ(i))>6 && (TZ(i))<=7;
1176. fr2(4,1)=fr2(4,1)+1;
1177. elseif (TZ(i))>7 && (TZ(i))<=8;

```

```

1178. fr2(5,1)=fr2(5,1)+1;
1179. elseif (TZ(i))>8 && (TZ(i))<=9;
1180. fr2(6,1)=fr2(6,1)+1;
1181. elseif (TZ(i))>9 && (TZ(i))<=10;
1182. fr2(7,1)=fr2(7,1)+1;
1183. elseif (TZ(i))>10 && (TZ(i))<=11;
1184. fr2(8,1)=fr2(8,1)+1;
1185. elseif (TZ(i))>11 && (TZ(i))<=12;
1186. fr2(9,1)=fr2(9,1)+1;
1187. elseif (TZ(i))>12 && (TZ(i))<=13;
1188. fr2(10,1)=fr2(10,1)+1;
1189. elseif (TZ(i))>13 && (TZ(i))<=14;
1190. fr2(11,1)=fr2(11,1)+1;
1191. elseif (TZ(i))>14 && (TZ(i))<=15;
1192. fr2(12,1)=fr2(12,1)+1;
1193. elseif (TZ(i))>15 && (TZ(i))<=16;
1194. fr2(13,1)=fr2(13,1)+1;
1195. elseif (TZ(i))>16 && (TZ(i))<=17;
1196. fr2(14,1)=fr2(14,1)+1;
1197. elseif (TZ(i))>17 && (TZ(i))<=18;
1198. fr2(15,1)=fr2(15,1)+1;
1199. elseif (TZ(i))>18 && (TZ(i))<=19;
1200. fr2(16,1)=fr2(16,1)+1;
1201. elseif (TZ(i))>19 && (TZ(i))<=20;
1202. fr2(17,1)=fr2(17,1)+1;
1203. elseif (TZ(i))>20 && (TZ(i))<=21;
1204. fr2(18,1)=fr2(18,1)+1;
1205. elseif (TZ(i))>21 && (TZ(i))<=22;
1206. fr2(19,1)=fr2(19,1)+1;
1207. elseif (TZ(i))>22 && (TZ(i))<=23;
1208. fr2(20,1)=fr2(20,1)+1;
1209. elseif (TZ(i))>23 && (TZ(i))<=24;
1210. fr2(21,1)=fr2(21,1)+1;
1211. elseif (TZ(i))>24 && (TZ(i))<=25;
1212. fr2(22,1)=fr2(22,1)+1;
1213. elseif (TZ(i))>25 && (TZ(i))<=26;
1214. fr2(23,1)=fr2(23,1)+1;
1215. elseif (TZ(i))>26 && (TZ(i))<=27;
1216. fr2(24,1)=fr2(24,1)+1;
1217. elseif (TZ(i))>27 && (TZ(i))<=28;
1218. fr2(25,1)=fr2(25,1)+1;
1219. elseif (TZ(i))>28 && (TZ(i))<=29;
1220. fr2(26,1)=fr2(26,1)+1;
1221. elseif (TZ(i))>29 && (TZ(i))<=30;
1222. fr2(27,1)=fr2(27,1)+1;
1223. elseif (TZ(i))>30 && (TZ(i))<=31;
1224. fr2(28,1)=fr2(28,1)+1;
1225. elseif (TZ(i))>31 && (TZ(i))<=32;
1226. fr2(29,1)=fr2(29,1)+1;
1227. elseif (TZ(i))>32 && (TZ(i))<=33;
1228. fr2(30,1)=fr2(30,1)+1;
1229. elseif (TZ(i))>33 && (TZ(i))<=34;
1230. fr2(31,1)=fr2(31,1)+1;
1231. elseif (TZ(i))>34 && (TZ(i))<=35;
1232. fr2(32,1)=fr2(32,1)+1;
1233. elseif (TZ(i))>35;
1234. fr2(33,1)=fr2(33,1)+1;
1235. end
1236. end
1237. figure(3) %Gráfico de frecuencias
1238. plot(fr1,fr2,'-b*');
1239. xlabel('Temperatura(°C)');
1240. ylabel('Frecuencia (hrs/año)');
1241. title('Distribucion de temperaturas');

```

6.4. ANEXO 1

6.4.1. VISTA DE PLANTA CASA MIDUVI

Los planos base han sido tomados de los diseños para el sector de Santa Teresa del cantón Ponce Enríquez, su fecha de elaboración fue en Mayo del año 2011.

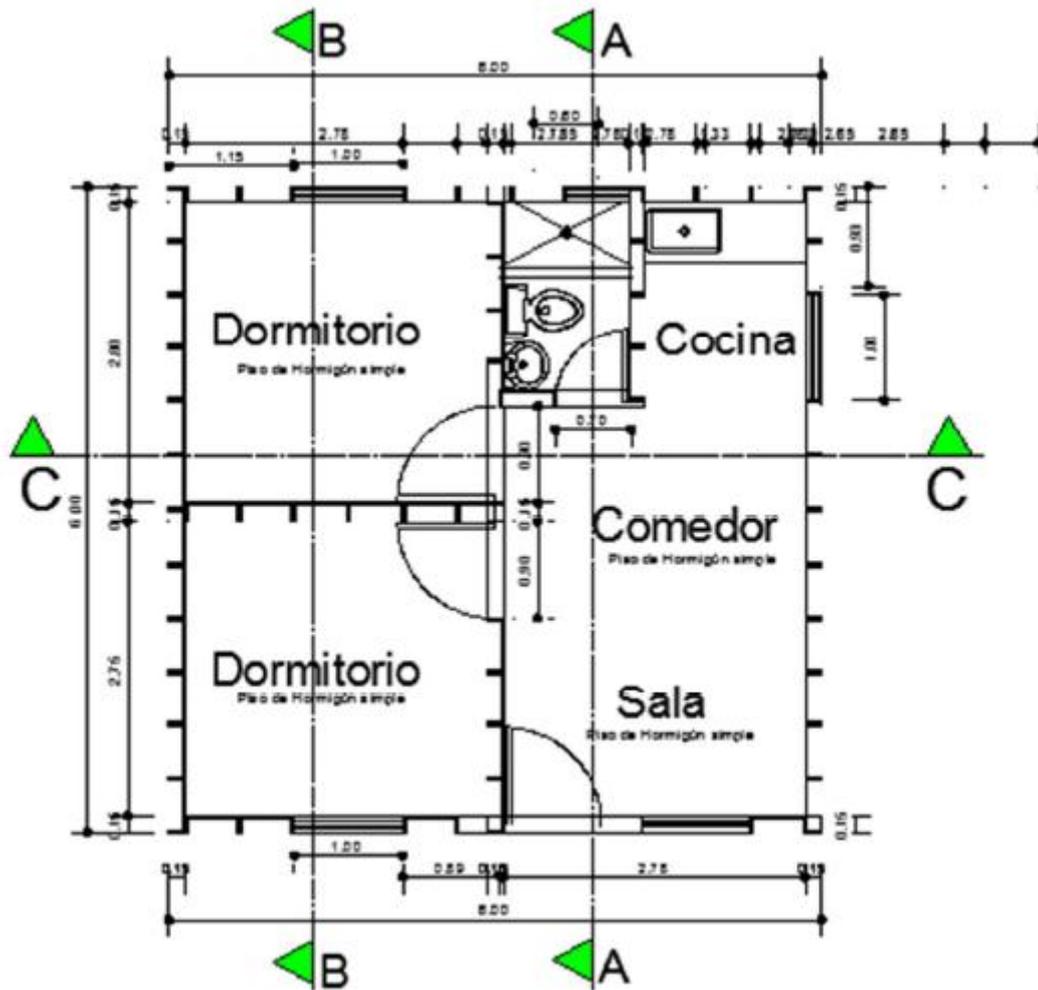


Figura 6.20. Vista de planta casa MIDUVI