



AZCAPOTZALCO
COSEI. DOCUMENTACIÓN

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias y Artes para el Diseño

**ESTUDIO COMPARATIVO DE
DOS MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA
PARA EL DISEÑO TÉRMICO DE EDIFICIOS
EN LA REPÚBLICA MEXICANA.**

Maestría en Diseño

Línea de Arquitectura Bioclimática

Autor

Fernando Francisco Velasco Montiel

Tesis para optar al

Grado de Maestro en Diseño

Línea de Arquitectura Bioclimática



AZCAPOTZALCO
COSEI. DOCUMENTACIÓN

México, D.F. Abril de 1999.



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

M-2



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias y Artes para el Diseño

**ESTUDIO COMPARATIVO DE
DOS MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA EL DISEÑO
TÉRMICO DE EDIFICIOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA.**

Maestría en Diseño
Línea de Arquitectura Bioclimática

Autor
Fernando Francisco Velasco Montiel

Tesis para optar al
Grado de Maestro en Diseño
Línea de Arquitectura Bioclimática

Aprobada por el Jurado

Tutor de Tesis: _____ **Dr. Rubén Dorantes Rodríguez**

Miembros del Jurado:

Presidente	_____	Dr. José Diego Morales Ramírez
Secretario:	_____	M. En A. Aníbal Figueroa Castrejón
Vocal:	_____	Dra. Gabriela Alvarez García
Vocal:	_____	Dr. Christopher Heard
Vocal:	_____	Dr. David Morillón Gálvez

México, D.F. Abril de 1999.



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

Agradecimientos

La conclusión del presente trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de muchas personas a quienes deseo hacer patente mi agradecimiento:

En primer lugar quiero agradecer al Dr. Rubén Dorantes por su confianza y por su infinita paciencia y apoyo en las diferentes etapas que implicó la elaboración de este trabajo.

Gracias al Dr. Diego Morales, la Dra. Gabriela Alvarez, el Dr. Christopher Heard y el Dr. David Morillón, por el interés puesto en el tema de estudio y facilitar los medios para poder llevar a cabo los análisis realizados con los diferentes modelos de simulación y balance térmico.

Así mismo un agradecimiento especial al Arq. Alfredo Fernández por su amable colaboración en el manejo de TRNSYS.

Gracias al Arq. Aníbal Figueroa, al Arq. Víctor Fuentes y al grupo de Diseño Bioclimático de la UAM Azcapotzalco por el apoyo y las observaciones realizadas durante el proceso de este trabajo. Agradezco también la colaboración del Ing. Benito Pérez por facilitar la información necesaria del caso de estudio para llevar a cabo el análisis empírico de los modelos de simulación.

Gracias a Susy, Memo, Laura y Dalos por brindarme su confianza y ánimo durante todo este proceso. Gracias a Ari por su preocupación y apoyo y por compartir los momentos, el espacio y los ideales.

Finalmente quiero agradecer a mis padres por su preocupación, consejos, apoyo, cariño, paciencia y confianza; por haber estado siempre ahí, a quienes dedico esta trabajo.

RESUMEN

La actual preocupación no sólo nacional, sino internacional, por optimizar el consumo de energía en los edificios, ha generado un creciente interés en los últimos años por hacer más eficientes las envolventes constructivas de las edificaciones. Simultáneamente, el acelerado desarrollo de la computación, aunado al incremento de la potencia de las computadoras personales y la disminución de sus costos, ha puesto al alcance del público general, una numerosa cantidad de programas de simulación energética, cada día más sofisticados, que si se utilizan adecuadamente, pueden ayudar en gran medida a producir diseños arquitectónicos más eficientes y de un bajo consumo energético.

Si bien hoy en día existe un gran número de programas de simulación térmica, se ha observado que en México son dos los que más han logrado conocerse: TRNSYS y DOE-2. Para facilitar su empleo, estos programas tienen, dentro de sus bases de datos, características climáticas y constructivas propias de los Estados Unidos (donde han sido desarrollados), pero se ha constatado su facultad para simular prácticamente cualquier sistema constructivo del que se conozcan sus componentes y propiedades termofísicas, así como las características climáticas del lugar. Tales propiedades hacen viable la aplicación de estos modelos en la República Mexicana, sin embargo, su precisión puede verse afectada, debido a que algunas de sus ecuaciones han sido desarrolladas a partir de correlaciones de características constructivas norteamericanas, caracterizadas por su ligereza y donde la opción para incrementar su eficiencia se basa en el incremento del aislamiento y no en el mejoramiento de su constitución, contrastando con la República Mexicana, donde los climas son más benéficos y la factibilidad del acondicionamiento pasivo pone al aislamiento en un papel secundario.

Con el objeto de comprobar la precisión de estos modelos en la República Mexicana, es necesaria la comparación de sus salidas con los datos de un monitoreo en una estructura real. En este sentido existe un estudio realizado por Fernández¹⁴, donde se comparan las salidas de TRNSYS con un monitoreo en una casa habitación, pero en el caso de DOE-2 hasta la fecha no existe algún estudio que, de manera empírica, valide su aplicación en nuestro país; por tal motivo, en el presente trabajo se presentan dos análisis experimentales con ambos modelos así como un estudio de sensibilidad de TRNSYS.

Para tal efecto se cuenta con los datos monitoreados en un departamento en la ciudad de México así como otro monitoreo realizado en Hermosillo Sonora, con los cuales se comparan de manera experimental las salidas de ambos modelos. Así mismo se evalúan las características de las entradas, la complejidad de uso de los programas, las suposiciones que hace cada uno de ellos y el tipo de salidas que presentan, proporcionando así, un amplio panorama de las ventajas y/o desventajas de la aplicación de estos dos programas en México.

ÍNDICE

	PÁGINA
AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
INDICE	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE GRÁFICAS	xiii
NOMENCLATURA	xv
INTRODUCCIÓN	1
1. UBICACIÓN DEL PROBLEMA	5
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Principio Generales de Transferencia de Calor en Edificios	11
2.2 Control Térmico	23
2.2.1 Balance Térmico	23
2.2.2 Inercia Térmica	25
2.3. Métodos de Cálculo Térmico	26
2.3.1 Métodos en Estado Permanente	27
2.3.2 Métodos de Correlación	28
2.3.3 Métodos Dinámicos	28
2.3.4 Métodos de Simulación	30
2.4 Métodos para dar Validez a los Modelos de Simulación Térmica de Edificios	31
2.5 Estudios Previos para la Validación de Modelos de Simulación Térmica de Edificios	34
2.5.1 Pruebas Comparativas	34
2.5.2 Validación Empírica	48

3. ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN TÉRMICA:	
TRNSYS 13.1 Y DOE-2.1E	65
3.1. Características Generales de los Modelos	67
3.1.1 TRNSYS	67
3.1.2 DOE-2	68
3.2 Arquitectura de los Modelos	69
3.3 Diagramas de Flujo	74
3.4. Metodologías	77
3.4.1 TRNSYS 13.1 – TYPE 12	78
3.4.2 TRNSYS 13.1 – TYPE 19	83
3.4.3 TRNSYS 13.1 –TYPE 56 y DOE-2.1E	90
3.4.3.1 Método de Función de Transferencia	90
3.4.3.2 Ganancias de Calor por Conducción a través de Muros y Techos Exteriores	91
3.4.3.3 Ganancias de Calor a través de Divisiones Interiores, Pisos y Plafones	92
3.4.3.4 Ganancias de Calor a través de Superficies Traslúcidas	93
3.4.3.5 Ganancias Internas de Calor	95
3.5 Características de las Librerías	103
3.5.1 Datos Climáticos	104
3.5.2 Procesadores de Datos Climáticos	107
3.5.3 Procesadores de Radiación Solar	110
3.5.4 Datos de Materiales y Sistemas Constructivos	112
3.6 Características de las Entradas de los Simuladores	114
3.6.1 Características de las Instrucciones	115
3.6.2 Estructura de las Entradas	122
3.6.3 Tipo de Información	125
3.6.3.1 Análisis de las Entradas del TYPE 12 (TRNSYS 13.1)	125
3.6.3.2 Análisis de las Entradas del TYPE 19 (TRNSYS 13.1)	127
3.6.4 BID (Building Input Description) y LOADS	135
3.7 Características de las Salidas	154
3.8 Capacidad de los Simuladores	158
3.9 Disponibilidad de los Modelos	159

4. APLICABILIDAD DE LOS MODELOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA	162
4.1. Información Climatológica	163
4.2. Materiales y Sistemas Constructivos	169
5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TRNSYS v. 13.1	172
5.1 Metodología	173
5.2 Determinación de los Parámetros factibles de Análisis	174
5.3 Características de los Espacios Simulados	174
5.3.1 Primer Caso de Estudio: Una Habitación	175
5.3.2 Segundo Caso de Estudio: Un Espacio destinado para Laboratorio de Investigación	175
5.4 Características de los Parámetros	176
5.5 Período de Calentamiento	184
5.6 Análisis de los Resultados	187
5.7 Conclusiones	197
6. 1^{er} ANÁLISIS EXPERIMENTAL: TRNSYS 13.1	199
6.1 Metodología	200
6.2 Descripción del Caso de Estudio	201
6.2.1 Descripción del Espacio	203
6.2.2 Características Constructivas del Espacio	203
6.2.3 Algunas Consideraciones Importantes	205
6.2.4 Datos Climatológicos	207
6.2.5 Condiciones del Monitoreo Interior	209
6.3 Simulaciones en TRNSYS 13.1	209
6.3.1 Definición del Edificio	209
6.3.2 Ganancias Internas	210
6.3.3 Ventilación e Infiltración	211
6.4 Análisis de Resultados	212
6.5 Conclusiones	216
7. 2^o ANÁLISIS EXPERIMENTAL: TRNSYS 13.1 Y DOE-2.1E	218

4. APLICABILIDAD DE LOS MODELOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA	162
4.1. Información Climatológica	163
4.2. Materiales y Sistemas Constructivos	169
5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TRNSYS v. 13.1	172
5.1 Metodología	173
5.2 Determinación de los Parámetros factibles de Análisis	174
5.3 Características de los Espacios Simulados	174
5.3.1 Primer Caso de Estudio: Una Habitación	175
5.3.2 Segundo Caso de Estudio: Un Espacio destinado para Laboratorio de Investigación	175
5.4 Características de los Parámetros	176
5.5 Periodo de Calentamiento	184
5.6 Análisis de los Resultados	187
5.7 Conclusiones	197
6. 1º ANÁLISIS EXPERIMENTAL: TRNSYS 13.1	199
6.1 Metodología	200
6.2 Descripción del Caso de Estudio	201
6.2.1 Descripción del Espacio	203
6.2.2 Características Constructivas del Espacio	203
6.2.3 Algunas Consideraciones Importantes	205
6.2.4 Datos Climatológicos	207
6.2.5 Condiciones del Monitoreo Interior	209
6.3 Simulaciones en TRNSYS 13.1	209
6.3.1 Definición del Edificio	209
6.3.2 Ganancias Internas	210
6.3.3 Ventilación e Infiltración	211
6.4 Análisis de Resultados	212
6.5 Conclusiones	216
7. 2º ANÁLISIS EXPERIMENTAL: TRNSYS 13.1 Y DOE-2.1E	218

LISTA DE FIGURAS

FIGURA No.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1.1	Flujo de calor por conducción a través de un cuerpo homogéneo.	12
2.1.2	Convección entre el aire y una superficie sólida.	14
2.1.3	Características de los cuerpos al recibir la radiación.	19
2.1.4	Sistema de techo y muro de una edificación, compuestos por varias capas homogéneas.	21
2.1.5	Coefficiente global de transferencia de calor; valor "U", de sistemas de techos y muros de una edificación formados por capas homogéneas y capas no homogéneas.	22
2.2.1	Cargas Térmicas en una edificación.	24
2.2.2	Representación Gráfica del Retardo Térmico y la Amortiguación.	26
2.3.1	Diagrama de flujo para calcular las cargas de enfriamiento o calentamiento usando los algoritmos de la ASHRAE.	29
2.5.1	BESTEST. Edificio base (hipotético): ventanas orientadas al sur, sin sombrear.	37
2.5.2	Evaluación BESTEST: demanda de energía para calentamiento anual, edificio con alta masividad.	38
2.5.3	Evaluación BESTEST: efecto de la masa térmica en la carga anual de calentamiento y enfriamiento.	38
2.5.4	Evaluación BESTEST: efecto de la absorptividad de onda corta en la carga anual de enfriamiento	39
2.5.5.	Evaluación BESTEST: efecto de la emisividad en la carga anual de Calentamiento	40
2.5.6	Evaluación BESTEST: carga de enfriamiento anual	41
2.5.7	Edificios masivos, sin ventanas ni ventilación	43

2.5.8	Edificios masivos, con ventanas, sin ventilación	44
2.5.9	Edificios masivos, sin ventanas, con ventilación	44
2.5.10	Edificios ligeros, sin ventanas ni ventilación	45
2.5.11	Edificios ligeros, con ventanas, sin ventilación	46
2.5.12	Edificios ligeros, sin ventanas, con ventilación	47
2.5.13	Configuración de las casas de prueba de Pala.	49
2.5.14	Perspectiva de las casas y planta donde se muestra la ubicación de los sensores interiores (I-T1, I-T2, I-T3 e I-T4) para medir la temperatura.	49
2.5.15	Efecto del período de calentamiento o “warm-up period” en DOE-2 en las casas de alta masividad con ventanas sombreadas	50
2.5.16	DOE-2 vs. monitoreo. Configuración básica: color exterior original, ventanas sin sombrear y sin ventilación	52
2.5.17	DOE-2 vs. monitoreo. Configuración 2: color exterior original, ventanas sombreadas y sin ventilación.	53
2.5.18	DOE-2 vs. monitoreo. Configuración 3: color exterior blanco, ventanas sombreadas y sin ventilación	54
2.5.19	DOE-2 vs. monitoreo. Configuración 4: color exterior blanco, ventanas sombreadas y ventilación nocturna	56
2.5.20	Principal diferencia entre la Temperatura Máxima medida y la estimada por los modelos.	58
2.5.21	Principal diferencia entre la Temperatura Mínima medida y la estimada por los modelos.	58
2.5.22	Principal diferencia entre la demanda total de Energía de Calentamiento real y la estimada por los modelos	59
2.5.23	Comparación de resultados ente los diferentes modelos de simulación térmica y las condiciones reales (Escalera).	61
2.5.24	Comparación de resultados ente los diferentes modelos de simulación térmica y las condiciones reales (Estudio).	62

2.5.25	Comparación de resultados entre los diferentes modelos de simulación térmica y las condiciones reales (Recámara Principal).	63
3.3.1	Diagrama de flujo para la simulación de un edificio en TRNSYS v13.1.	76
3.3.2	Diagrama de flujo para la simulación de un edificio en DOE-2.1E.	77
3.6.1	Modo de Geometría 1 = Paralelepípedo Rectangular (TYPE 19).	134
3.6.2	Ubicación de puertas y ventanas para el Modo de Geometría 1 (TYPE 19).	134
3.6.3	Sistemas de coordenadas para la descripción geométrica del edificio en DOE-2.1E.	145
6.2.1	Corte de conjunto con un edificio de 10 niveles en la Unidad Habitacional Latinoamericana.	202
6.2.2	Planta baja del departamento simulado.	202
6.2.3	Planta alta del departamento simulado.	203
6.2.4	Planta arquitectónica de la habitación monitoreada.	204
6.2.5	Composición del entrepiso de vigueta y bovedilla.	205
6.2.6	Composición del techo de vigueta y bovedilla.	205
6.2.7	Datos climáticos utilizados para las simulaciones. Los registros fueron hechos en el Instituto de Geofísica de la UNAM, del 7 al 10 de Octubre de 1997.	208
7.2.1	Planta arquitectónica del Laboratorio de Termodinámica (2° nivel del laboratorio de Ingeniería Química, Universidad de Sonora).	219
7.2.2	Fachada Sur del Laboratorio de Ingeniería Química.	220
7.2.3	Ubicación del termopar dentro del espacio monitoreado en Hermosillo, Son. (cubículo 3).	225

LISTA DE TABLAS

TABLA	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.4.1	Ventajas y Desventajas de distintas técnicas de validación.	33
2.5.1.	Resumen de las configuraciones para las comparaciones de DOE-2 con el monitoreo	51
3.6.1	Tipos de entradas de los simuladores	115
3.6.2	Características de las Instrucciones y Palabras Clave de TRNSYS 13.1.	116
3.6.3	Características de las Instrucciones y Palabras Clave de DOE-2.1E.	117
3.6.4	Parámetros y Entradas del TYPE 12.	126
3.6.5	Parámetros y Entradas requeridas por el TYPE 19 para la descripción de la ZONA.	128
3.6.6	Parámetros y entradas del TYPE 19 para describir los MUROS, usando los elementos predefinidos de la ASHRAE	130
3.6.7	Parámetros y Entradas para la descripción de ventanas en el TYPE 19.	132
3.6.8	Datos para especificar la geometría del espacio, de puertas y de ventanas	134
3.6.9	Diferentes maneras de especificar un muro exterior en DOE-2.1E y TRNSYS 13.1.	138
3.6.10	Datos para describir las características de los muros en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.	139
3.6.11	Datos de entrada para las ventanas en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.	140
3.6.12.	Tipos de ganancias de calor en el espacio en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.	146
3. 6.13.	Métodos para calcular la infiltración en DOE-2.1E y TRNSYS 13.1	153
3.7.1	Opciones para especificar los formatos de las salidas en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E	155
3.7.2	Salidas opcionales de TRNSYS 13.1 – TYPE 56	156
3.7.3	Salidas opcionales en DOE-2 (espacio)	157

3.8.1	Número máximo de elementos permisibles en TRNSYS 13.1 (BID) y DOE-2 dentro de una simulación.	159
3.9.1	Versiones comerciales de DOE-2 en los estados Unidos.	161
5.3.1	Diferentes valores de resistencia térmica del aire, según la ASHRAE.	177
5.3.2	Casos propuestos para el análisis de la resistencia del aire.	177
5.3.3	Corridas propuestas para realizar el análisis de los Coeficientes de Transferencia por convección.	180
5.3.4	Valores de Cambios de Aire asignados para infiltración, ventilación e intercambio con espacios adyacentes.	182
5.6.1	Valores horarios de la temperatura estimada por TRNSYS 13.1 en los distintos casos de análisis de la Resistencia Térmica del Aire.	188
6.2.1	Propiedades termofísicas de los materiales utilizados en el edificio analizado.	204
6.3.1	Propiedades ópticas de las ventanas	210
6.3.2	Itinerarios y carga térmica de algunos elementos de la habitación simulada	211
7.2.1	Propiedades térmicas de los materiales constructivos del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Sonora.	221
7.4.1	Cargas térmicas e itinerarios correspondientes a cada espacio simulado.	227
7.7.1	Comparación entre las salidas de los modelos de simulación y las mediciones.	236
7.7.2	Criterios para la Evaluación de las predicciones de los modelos.	241
7.7.3	Temperaturas Máximas y Mínimas Absolutas y Diferencia entre las mediciones y las predicciones de los Modelos de Simulación.	242
7.7.4	Criterios para la Evaluación de las predicciones de los modelos de acuerdo al Error Porcentual de sus salidas.	247
7.7.5	Diferentes características de las salidas de los modelos, comparadas con los datos medidos.	244
7.8.1	Rangos encontrados en diversas fuentes de las propiedades térmicas de algunos materiales	248

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
5.5.1	Comparación durante las primeras 24 hrs. de las salidas de TRNSYS 13.1 (TYPE 56) y los datos medidos en un laboratorio, en Hermosillo, Son.	185
5.5.2	“Período de calentamiento” en TRNSYS 13.1= 7 días	186
5.6.1	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores de Resistencia Térmica del aire en la losa.	187
5.6.2	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores del Coeficiente de Convección Exterior.	189
5.6.3	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores constantes del Coeficiente de Convección Exterior, así como valores de acuerdo a la velocidad horaria del viento.	191
5.6.4	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores del Coeficiente de Convección Interior.	192
5.6.5	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores de Infiltración	193
5.6.6	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores de ventilación.	195
5.6.7	Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores intercambio de aire con los espacios adyacentes	196
6.4.1.	Comparación de temperatura estimada por TRNSYS 13.1-TYPE 56 y la medida en la habitación	213
6.4.2	Comparación de las salidas del TYPE19 - TYPE56 –Mediciones en la Habitación del Departamento	214
7.3.1	Datos meteorológicos monitoreados en el edificio del Laboratorio de Ingeniería Química, en Hermosillo, Son., del 18 al 25 de Diciembre de 1997.	223
7.5.1	Comparación de las salidas de TRNSYS usando h_o variable conforme a la velocidad de viento y h_o constante = $20.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.	231
7.6.1	Comparación de las temperaturas estimadas por TRNSYS v13.1, DOE-2.1E y las temperaturas medidas	233
7.7.1	Temperatura Máxima medida y estimada por los modelos de simulación.	237

7.7.2	Temperatura Mínima medida y estimada por los modelos de simulación.	238
7.7.3	Comparación entre la Oscilación Térmica diaria de las mediciones y las salidas de los modelos de simulación.	239
7.7.4	Retardo térmico de las salidas de los modelos con respecto a las mediciones en la temperatura máxima diaria.	240
7.7.5	Retardo térmico de las salidas de los modelos con respecto a las mediciones en la temperatura mínima diaria.	240

NOMENCLATURA

A = área de la superficie (m^2)

A_i = área del elemento i (m^2)

A_j = área de la superficie j (m^2)

b = espesor del material (m)

b_h , c_h y d_h = coeficientes de función de transferencia para los valores corrientes y previos de la temperatura sol-aire (T_{sa}), temperatura equivalente de la zona (T_{eq}) y flujo de calor (q_i) ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

b_n , c_n , d_n = coeficientes de transferencia por conducción ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

CAP = capacitancia de la estructura ($W/^\circ C$)

C_{min} = proporción mínima de capacitancia del fluido de la carga del intercambiador de calor. ($W/^\circ C$)

C_{pa} = calor específico del aire ($1.0065 \text{ kJ/kg } ^\circ C$)

E_M = eficiencia del motor (fracción decimal < 1.0)

$1/fe$ = resistencia superficial exterior ($m^2 \text{ } ^\circ C/W$)

F_η = factor de pérdida de flujo (1.0 o fracción decimal < 1.0)

fg = factor de ganancia solar (W/m^2)

$1/fi$ = resistencia superficial interior ($m^2 \text{ } ^\circ C/W$)

F_{LM} = factor de carga del motor (1.0 o fracción decimal < 1.0)

F_n = factor de radiación. Es importante en los casos de preparación de comida, donde se considera que cuando se cuenta con un extractor efectivo, el calor que proviene en forma radiante de las superficies de los accesorios y utensilios de cocina equivale al 32% de la

entrada máxima horaria de calor y es el único que afectará a la carga de enfriamiento del espacio, mientras que la energía convectiva y latente son despreciables.

(1.0 o fracción decimal <1.0)

F_{sa} = factor de tolerancia especial de la iluminación. (sin unidades)

F_{ul} = factor de uso de la iluminación (1.0 o fracción decimal <1.0)

F_{UM} = factor de uso del motor (1.0 o fracción decimal <1.0)

F_{ua} = factor de uso (1.0 o fracción decimal <1.0)

G = densidad de la energía radiante incidente (W/m^2)

h_{cj} = coeficiente de convección de la superficie j ($W/m^2\ ^\circ C$)

h_{con} = coeficiente de convección ($W/m^2\ ^\circ C$)

$h_{c,o}$ = coeficiente de transferencia de calor por convección exterior. ($W/m^2\ ^\circ C$)

h_i = coeficiente de convección interior ($W/m^2\ ^\circ C$)

h_o = coeficiente de convección exterior ($W/m^2\ ^\circ C$)

h_r = coeficiente de radiación ($W/m^2\ ^\circ C$)

$h_{r,ij}$ = coeficiente de transferencia de calor radiante linearizado. ($W/m^2\ ^\circ C$)

I_T = radiación solar total incidente (W/m^2)

i = número de superficies

K_1, K_2, K_3 = constantes empíricas. Algunos valores de estas constantes, para diferentes calidades de

construcción, se enlistan en el ASHRAE Handbook of Fundamentals¹⁵ y también se presentan en el manual de TRNSYS v13.1.

k = conductividad térmica ($W/m\ ^\circ C$)

La = ancho de la sección formada con capas homogéneas distintas a la sección (b). (m)

Lb = ancho de la sección formada con capas homogéneas distintas a la sección (a). (m)

$\dot{m}_v$	= proporción de la masa del flujo de aire de la ventilación	(kg/hr)
$\dot{m}_l$	= proporción del flujo de la masa de aire que entra	(kg/hr)
N	= número de personas dentro del espacio	
N_i	= fracción de calor absorbido por el vidrio y que fluye hacia el interior del espacio por convección	(%)
P	= potencia del equipamiento	(HP) (1HP = 0.746 kW)
q	= flujo de energía calorífica	(W)
$q_{e,\theta}$	= ganancia de calor a través de muros o techos, a la hora de cálculo θ	(W)
q_{el}	= ganancia de calor	(W)
q_{em}	= flujo de calor equivalente de operación del equipamiento	(W)
q_{il}	= ganancia de calor latente de los accesorios.	(W)
q_{is}	= ganancia de calor sensible proporcionado por los accesorios	(W)
q_l	= carga de calor latente	(W)
q_{pe}	= ganancia de calor del elemento divisorio, a la hora de cálculo θ	(W)
q_s	= carga de calor sensible	(W)
Q_c	= flujo de calor por conducción	(W)
Q_{cool}	= proporción de enfriamiento por el acondicionador de aire	
Q_e	= pérdidas de calor por enfriamiento evaporativo.	(W)
Q_{gain}	= todas las ganancias de calor que varían con el tiempo	(W)
Q_{infl}	= ganancias por infiltración	(W)
Q_i	= ganancias de calor internas	(W)
Q_{int}	= ganancias internas que no sean producto de la iluminación o personas	(W)

- $\dot{Q}_L$ = la pérdida de calor instantáneo de la estructura menos las ganancias internas. (W)
- $\dot{Q}_{lat}$ = la proporción a la cual la entrada de enfriamiento se usa para reducir la humedad del cuarto (W)
- $\dot{Q}_m$ = calentamiento o enfriamiento mecánico (W)
- $\dot{Q}_r$ = Flujo de calor por radiación (W)
- $\dot{Q}_s$ = ganancias por radiación solar directa (W)
- $\dot{Q}_{spepl}$ = ganancias de energía de la zona como producto de la energía sensible de las personas (W)
- $\dot{Q}_{sc}$ = carga de enfriamiento sensible de los elementos de ganancia de calor que sólo contienen componentes convectivas (W)
- $\dot{Q}_T$ = la energía que es transferida dentro del espacio a través del intercambiador de la carga de calor al fluido de enfriamiento. (W)
- $\dot{Q}_v$ = ganancias por ventilación de calor (W)
- $\dot{Q}_v$ = flujo de calor por convección (W)
- $\dot{Q}_z$ = ganancias de calor por convección provenientes de espacios adosados (W)
- R = resistencia total ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- R_a = valor de la Resistencia térmica total del sistema en la sección (a) ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- R_b = valor de la Resistencia térmica total del sistema en la sección (b) ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- R_t = resistencia del objeto o elemento ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- R_{film} = resistencia de la capa de aire exterior ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)
- s_i = la suma de todas las ganancias por radiación absorbidas por la superficie (W)
- SC = coeficiente de sombreado del vidrio utilizado (fracción decimal <1.0)
- $SHGF$ = factor de ganancia de calor solar. Depende de la orientación, latitud, hora y mes para los cuales se esté llevando a cabo el cálculo (W/m^2)
- Δt = intervalo de tiempo de la simulación (hr)

Δt_c	= periodo de tiempo dentro del intervalo de tiempo de la simulación en el cual la temperatura del cuarto se encuentra dentro del rango de confort	(hr)
T	= Temperatura absoluta	(°C)
T_a	= temperatura del ambiente exterior	(°C)
T_b	= temperatura del aire del espacio adyacente	(°C)
T_{eq}	= temperatura equivalente. Es la temperatura del aire interior, la cual, en ausencia del intercambio de radiación con la superficie interior, le daría la misma transferencia de calor	(°C)
T_i	= temperatura del flujo de aire que entra	(°C)
T_{min}	= temperatura determinada para calentamiento	(°C)
T_{max}	= temperatura determinada para enfriamiento	(°C)
T_o	= temperatura del aire exterior	(°C)
T_R	= temperatura del cuarto	(°C)
T_{RC}	= temperatura promedio del cuarto durante el intervalo de tiempo dentro del rango de Confort	(°C)
T_{sa}	= temperatura sol-aire, que es la temperatura del aire exterior, la cual, en ausencia de todos los intercambios de radiación, daría la misma transferencia de calor a la superficie exterior como ocurre actualmente.	(°C)
$t_{\theta-\delta}$	= temperatura sol-aire a la hora θ , - δ	(°C)
$T_{s,i}$	= temperatura superficial interior del elemento i.	(°C)
T_v	= temperatura del aire de ventilación	(°C)
T_z	= temperatura del aire de la zona	(°C)

T_1	= Temperatura más alta	(°C)
T_2	= Temperatura más baja	(°C)
ΔT	= diferencia de temperatura	(K)
U	= coeficiente global de transferencia de calor	(W/m ² °C)
$U_{g,o}$	= coeficiente de transferencia de calor de la ventana incluyendo convección de las superficies interior y exterior	(W/m ² °C)
U_t	= valor ponderado de la conductancia total del sistema de techo o muro	(W/m ² °C)
V	= ventilación	(cambios de aire/hora)
V_a	= volumen de aire de la zona	(m ³)
W	= velocidad de viento	(m/s)
ΔW	= humedad absoluta del aire interior menos la humedad absoluta del aire exterior	(kg de agua / kg de aire seco)
X_i	= entradas que varían con el tiempo y afectan a $T_{s,i}$	(sin unidades)
$Z_{i,j}$	= coeficiente que relaciona la transferencia de calor entre i y j.	(sin unidades)
α	= absortancia exterior de la superficie a la radiación solar	(1.0 o fracción decimal <1.0)
σ	= constante de Stefan-Boltzmann	$= 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$
ε	= efectividad de la carga del intercambiador de calor	(%)
ρ	= la densidad del aire de la zona	(kg/m ³)
θ	= hora a la cual se realiza el cálculo	(hr)
δ	= intervalo de tiempo	(hr)
$v_0, v_1, v_2, \dots, w_1, w_2, \dots$	= coeficientes de RTF (<i>Room Transfer Functions</i>)	(sin unidades)

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el alto consumo de energía en edificios, como resultado de la climatización artificial para mantener condiciones aceptables de confort térmico, ha propiciado el desarrollo de programas computacionales para la simulación del comportamiento térmico de edificios. Aunque en la República Mexicana es poco lo que se conoce acerca de estos programas, en los países más desarrollados de Europa y Estados Unidos, tienen ya varios años de ser del dominio público. La American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), es una de las asociaciones que más tiempo tienen realizando estudios relacionados con el comportamiento térmico de la envolvente de los edificios, así como de los factores que influyen en ellos para mantener condiciones aceptables de confort, y ha llegado a plantear diferentes metodologías para poder predecir las condiciones térmicas que prevalecerán en el interior, enfocándose principalmente al diseño de equipos de aire acondicionado. Algunas de estas metodologías han sido adoptadas por algunos de los programas computacionales que se enfocan al diseño térmico de los edificios, y han sido organizadas y programadas de diferentes maneras para lograr una mayor velocidad en su ejecución.

En un estudio realizado en 1985 entre los países de la Agencia de Energía Internacional (IEA), ya se encontraban 215 programas distintos¹, de los cuales algunos ya han salido del mercado y otros nuevos se han incorporado. La magnitud de los problemas que puede solucionar cada programa varía considerablemente, así como la precisión de sus resultados, incluso el programa más detallado contiene muchas suposiciones simplificadas, errores y fallas que en algunos casos pueden traer consigo desaciertos significativos en la predicción del comportamiento térmico de un edificio.

Entre las principales limitaciones que tiene la aplicación de estos programas en nuestro país está el hecho que han sido desarrollados en el extranjero, por lo que sus bases de datos contienen referencias tanto de climas, como de materiales y sistemas constructivos ajenos a los nuestros, y aunque esto no imposibilita su empleo, si lo hace un poco más tedioso, pues es necesario generar bases de datos con características nacionales con las que se puedan hacer simulaciones más apegadas a la realidad y por lo tanto, más válidas.

Por esta razón, y con el objeto de conocer el estado del arte de las metodologías utilizadas por los Modelos de Simulación, dentro del programa de investigación USO DE LA ENERGÍA EN EDIFICACIONES de la UAM, se viene trabajando en una línea de investigación que tiene como propósito el analizar y comparar diversos programas de simulación térmica existentes en el mercado, comparando sus metodologías de cálculo térmico, la arquitectura del programa, el tipo de bases de datos utilizadas y las salidas que proporcionan.

En la presente investigación se presenta un estudio comparativo de dos modelos: TRNSYS v13.1 y DOE-2 v2.1E, los cuales fueron considerados por ser de los programas más conocidos hasta ahora en nuestro país y por proporcionar resultados con una aceptable precisión. Ambos programas tienen la ventaja de que el usuario puede conocer las metodologías empleadas, las ecuaciones y algoritmos que realizan las simulaciones así como realizar modificaciones de acuerdo a los intereses particulares.

El planteamiento del problema, en el cual se mencionan las razones por las cuales se ha considerado necesario realizar este trabajo, se presenta en el capítulo 1. En el capítulo 2 se presenta la revisión

bibliográfica, que incluye desde los principios generales de transferencia de calor en edificios, hasta los resultados obtenidos en diversos estudios enfocados a dar validez a los programas, en los cuales se han considerado los modelos de simulación más reconocidos a nivel mundial.

A partir del capítulo 3 se presenta el análisis realizado con los programas de simulación TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E, los cuales fueron seleccionados por ser de los programas más importantes para la simulación térmica de edificios a nivel mundial, además de ser los programas más conocidos en la República Mexicana y a los cuales fue posible tener acceso para la realización de este estudio.

El análisis del programa se hizo con dos tipos de comparaciones. En primer lugar, se realizó un análisis y comparación de los aspectos teóricos de los programas, donde se incluye su arquitectura, diagramas de flujo, bases de datos, metodologías, entradas, salidas, disponibilidad, etc., lo cual se presenta en el capítulo 3.

Como parte complementaria de la parte teórica, en el capítulo 4 se realizó un análisis de la aplicabilidad que pueden tener los modelos en la República Mexicana, tomando en cuenta las bases de datos de los modelos, las características de los programas de procesamiento, las características constructivas y climáticas propias de nuestro país y la disponibilidad de información en la República Mexicana, necesaria para poder correr los programas.

En segundo lugar, se realizaron comparaciones de las salidas de los programas con datos obtenidos de mediciones en espacios reales, para lo que se contó con los datos de un monitoreo realizado en una habitación de un departamento en la ciudad de México, D.F., y otro realizado en un espacio

destinado para un laboratorio de investigación de la Universidad Autónoma de Sonora, en Hermosillo, Sonora.

Antes de realizar las corridas definitivas con los modelos de simulación, en el capítulo 5 se presenta un análisis de sensibilidad con el programa TRNSYS 13.1, por ser el único modelo disponible para dicho fin. En este análisis se detectaron algunas variables que presentan cierta incertidumbre dentro de las entradas del programa y que pueden tener influencia en las salidas del mismo.

La primera comparación entre las salidas de los modelos y los datos medidos se presenta en el capítulo 6, en el cual se comparan los datos monitoreados en la habitación localizada en la ciudad de México, D.F. y las salidas del programa TRNSYS 13.1. Cabe mencionar que en éste caso, la habitación de estudio se encontraba habitada durante el monitoreo, por lo que se presentaron algunas variables que no pudieron ser definidas ni controladas con precisión.

En el capítulo 7 se presenta el otro caso analizado, correspondiente a un laboratorio en un edificio de la Universidad de Sonora, en Hermosillo, Sonora. En este caso las condiciones del monitoreo fueron mucho más controladas y los datos registrados se compararon con las salidas tanto de TRNSYS 13.1 como de DOE-2.1E.

Finalmente, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas de los análisis, comparativo y experimental, realizados a TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E, una tabla de las ventajas y desventajas de los mismos y algunas observaciones para su aplicación en la República Mexicana.

Capítulo 1

UBICACIÓN DEL PROBLEMA

El gran consumo energético que se desató a partir de la Revolución Industrial trajo consigo fuertes consecuencias sociales, económicas y políticas, aunadas a un fuerte deterioro ambiental debido a la excesiva explotación de recursos fósiles como principal fuente de energía.

Para principios de los años setenta, los estudios acerca de las reservas probadas de hidrocarburos en el mundo, aseguraban que de seguir con el mismo ritmo de uso, quedarían solamente 30 años de consumo de petróleo². Esta situación, sumada al embargo petrolero de los países de la OPEP en 1973, provocó la preocupación de los países industrializados, derivando en la promoción de políticas de conservación y eficiencia, en la proliferación de alternativas energéticas (desde la nuclear hasta la solar) y en la inversión en investigación para la obtención de tecnologías más eficientes. Como resultado de éstas medidas, en las últimas dos décadas, el consumo de energía primaria de los países industrializados disminuyó del 60% a 48% con respecto al consumo de energía primaria mundial².

Una de las principales actitudes que adoptaron los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) a partir de 1973, fue la generación de políticas de conservación y eficiencia energética, fundamentalmente para el sector residencial, que en promedio representa el 20% del consumo final de la energía, de tal manera que entre 1973 y 1983 contribuyó en un millón de barriles de petróleo diarios al ahorro de energía en siete países de esta Organización². Entre estas

políticas se pueden mencionar el mejoramiento del aislamiento para los muros y techos de las viviendas, la promoción del uso de la energía solar pasiva y la eficiencia de la tecnología para calefacción (principal uso final de la energía en la mayoría de los países de la OCDE)².

La generación de nuevas políticas y requerimientos de diseño para la optimización de los recursos energéticos en los edificios, trajo a su vez la necesidad de nuevas herramientas que permitieran al diseñador llevar a cabo cálculos más rápidos y eficientes de la respuesta de la envolvente y de los sistemas de acondicionamiento, a las variaciones, dependientes del tiempo, de calor y humedad como resultado del clima exterior y de las actividades humanas en el interior.

Este tipo de herramientas, que necesariamente tenían que operar en computadoras, se empezaron a desarrollar y ser utilizadas en los 70's en los países más desarrollados, pero su costo de operación era muy elevado, amén de la dificultad para su uso y las limitaciones en su campo. Además, las diferencias en los algoritmos y suposiciones podían causar que diversos programas tuvieran resultados ampliamente diferentes.

Hoy en día la gran potencia y velocidad de las computadoras y la accesibilidad de sus costos, ha generado la proliferación de un gran número de programas de cómputo que permiten realizar el cálculo energético de los edificios, e incluso de sus costos, de una manera muy rápida y eficiente. En un estudio realizado en 1985 por la Agencia de Energía Internacional¹ (IEA) se identificaron 215 programas distintos de este tipo. A la fecha algunos de estos programas ya han salido del mercado y otros nuevos se han incorporado. La magnitud de los problemas que puede solucionar cada uno de

ellos varía considerablemente, así como la precisión de sus resultados; incluso el programa más detallado contiene muchas suposiciones simplificadas, errores y fallas que en algunos casos pueden traer consigo desaciertos significativos en la predicción del uso de la energía ¹.

Bajo estas circunstancias, en Estados Unidos, el Departamento de Energía (DOE) en colaboración con el Departamento de Desarrollo Residencial y Urbano (HUD) identificaron en 1991 la necesidad de desarrollar procedimientos de control de calidad para evaluar y verificar los métodos de predicción de la energía usados por los proveedores de Sistemas de Estimación de Energía Residencial (HERS), dando como resultado una metodología para evaluar este tipo de programas, misma que actualmente está siendo adoptada por la American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), Canadá, Gran Bretaña, Finlandia, Bélgica, Francia, Italia, España, Suecia, Estados Unidos, la Comisión de Energía de California y el Consejo de HERS³.

México, sin embargo, a pesar de ser miembro de la OCDE desde abril de 1994, no cuenta hasta la fecha con algún reglamento que obligue a diseñadores y constructores a hacer uso de este tipo de herramientas que apoyen al ahorro de energía, aunque es importante reconocer que existen importantes diferencias en el uso de la energía con respecto al resto de los países de dicha organización, por ejemplo, en México, al igual que en los demás países de la OCDE, el sector residencial representa cerca del 20% del consumo de la energía final, pero los usos finales dentro de éste rubro son ampliamente diferentes, ya que en los países de la OCDE el uso final de la energía de mayor importancia es la calefacción, mientras que en México es la cocción².

Esta, entre otras muchas diferencias, hacen suponer que la generación de políticas de conservación y uso de la energía en México deberán tener enfoques diferentes a los de otros países de la OCDE, aunque bien se puede aprovechar como ejemplo la experiencia de esta organización.

En México sólo existe hasta el momento una propuesta de norma realizada por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), que busca establecer los requerimientos mínimos de diseño y construcción de la envolvente de las edificaciones, con objeto de optimizar su comportamiento térmico y lograr el uso eficiente de la energía requerida para el acondicionamiento de los espacios interiores⁴. Desafortunadamente, la revisión y ajustes necesarios para la aprobación de la norma es un proceso lento, manteniendo pendiente hasta el momento su publicación oficial, sin embargo, tampoco se ha promovido el empleo de programas comerciales que apoyen a los diseñadores en este sentido.

Por otro lado, la austeridad de los resultados que se pueden obtener mediante la metodología propuesta en la norma (hasta el momento de realizar el presente estudio), hace imposible su comparación con los programas utilizados por otros países con el mismo propósito (por ejemplo, el programa DOE-2, que es la base técnica para establecer los códigos y estándares de energía en edificios en los Estados Unidos), pero bien puede incrementar de manera significativa la conciencia de generar diseños más eficientes y confortables que permitan importantes mejoras tanto económicas como ambientales.

Cabe mencionar que la aplicación de la norma no impide la evaluación térmica de los edificios mediante el uso de programas comerciales o del dominio público, mientras se demuestre que la edificación propuesta cumple con los requerimientos establecidos.

Al respecto es importante reconocer que los programas de simulación térmica tienen más de 20 años de ser del dominio público en Estados Unidos y Europa, pero en México hasta la fecha son prácticamente desconocidos, siendo utilizados solamente en algunos centros de investigación. En éste ámbito, se ha observado que son dos los programas que más han logrado conocerse: TRNSYS y DOE-2, ambos considerados entre los más importantes a nivel mundial¹.

Para facilitar su empleo, estos programas tienen, dentro de sus bases de datos, características climáticas y constructivas propias de los Estados Unidos (donde han sido desarrollados), pero se ha constatado su facultad para simular prácticamente cualquier sistema constructivo del que se conozcan sus componentes y propiedades termofísicas, así como las características climáticas del lugar. Tales propiedades hacen viable la aplicación de estos modelos en la República Mexicana, sin embargo, su precisión puede verse afectada, debido a que algunas de sus ecuaciones han sido desarrolladas a partir de correlaciones de características constructivas norteamericanas, caracterizadas por su ligereza y donde la opción para incrementar su eficiencia se basa en el incremento del aislamiento y no en el mejoramiento de su constitución, contrastando con la República Mexicana, donde los climas son más benéficos y la factibilidad del acondicionamiento pasivo pone al aislamiento en un papel secundario.

Con el objeto de comprobar la precisión de estos modelos en la República Mexicana, es necesaria la comparación de sus salidas con los datos de un monitoreo en una estructura real, donde se tengan condiciones aceptablemente controladas a fin de reducir lo más posible los márgenes de error. De ésta manera será posible determinar si su aplicación para la evaluación térmica de edificios en la República Mexicana es viable, o si debido a los amplios márgenes de error no es recomendable. Además, es conveniente dar a conocer las características de los modelos, de la facilidad o complejidad de su uso y aplicación, así como de la disponibilidad de datos para poder ejecutarlos, pues también de ello depende la factibilidad de su aplicación.

Por estos motivos, en el presente trabajo se busca comprobar la precisión de los modelos TRNSYS v13.1 y DOE-2 v2.1E, en primer lugar haciendo una comparación de sus características generales, de sus bases de datos, de su arquitectura y de su modo de operación, y en segundo lugar mediante la comparación de las salidas de ambos programas con los datos de un monitoreo en una estructura real, para lo que se cuenta con los registros de dos monitoreos, uno de ellos realizado en una habitación de un edificio multifamiliar, en la ciudad de México, D.F. y el otro en un espacio destinado como laboratorio de investigación, en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Capítulo 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los programas de Simulación Térmica de Edificios requieren de un amplio conocimiento, por parte del usuario, de los fenómenos termodinámicos y de transporte que ocurren en las edificaciones, así como la comprensión de los principios generales que rigen diversas metodologías de cálculo o balance térmico. Estos aspectos serán abarcados en el presente capítulo, así como un breve análisis de las observaciones realizadas en diversas investigaciones cuyo propósito es determinar, mediante diversas metodologías, la validez de algunos de los programas más conocidos a nivel mundial, de tal manera que se pueda tener un amplio panorama del estado del arte de dichos simuladores, incluyendo los dos modelos que se han analizado en este trabajo (TRNSYS v13.1 y DOE-2.1E).

2.1 Principios Generales de Transferencia de Calor en Edificios.

El comportamiento térmico de un edificio y su consecuente efecto en sus ocupantes, depende de las ganancias o pérdidas de calor que suceden entre el edificio y su medio ambiente, o entre los distintos espacios del interior del edificio mismo.

La transferencia de calor es el principal mecanismo por el cual los efectos del medio ambiente se manifiestan en el interior de los edificios, y se basa en los principios de la termodinámica, que

establecen: a) que la energía no se crea ni se destruye, sino sólo se transforma, y b) que el flujo de calor siempre se dará en la dirección del decremento de la temperatura.

Los tres mecanismos principales a través de los cuales se lleva a cabo dicha transferencia de calor son: la conducción, la convección y la radiación.

Conducción

La transferencia de calor por conducción se lleva a cabo fundamentalmente en los cuerpos sólidos cuando al ponerlos en contacto directo, el calor fluye del cuerpo más caliente al más frío.

La magnitud del flujo de calor a través de un cuerpo depende de varios factores, como el espesor del material, su conductividad térmica, la diferencia de temperatura entre los dos puntos considerados y del área expuesta al flujo del calor (fig. 2.1.1).

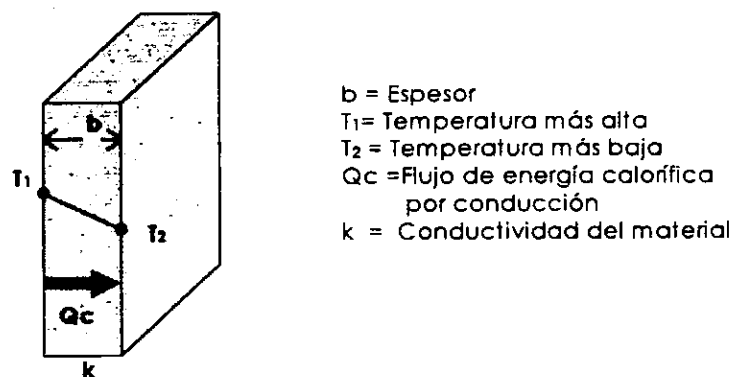


Figura 2.1.1. Flujo de calor por conducción a través de un cuerpo homogéneo.

La conductividad térmica de los materiales es la capacidad que tienen para conducir el calor, por ejemplo, la madera, que es considerada como un material aislante, tiene una conductividad muy baja, mientras que los metales, que son conocidos por ser muy buenos conductores de calor, tienen una alta conductividad. Por otra parte, todos los materiales tienen una distinta capacidad calorífica, es decir, que para que aumente su temperatura 1°C, la cantidad de calor que se deberá aplicar cada uno de ellos, será diferente.

Para explicar matemáticamente la conducción de calor, la Ley de Fourier establece que la proporción de transferencia de calor por conducción es directamente proporcional a la diferencia de temperatura y al área de flujo de calor, e inversamente proporcional a la distancia a través de la cual ocurre dicha conducción. Expresada como una ecuación, en un sistema uni-dimensional, con propiedades térmicas constantes, la Ley de Fourier se expresa de la siguiente manera:

$$Q_c = kA(\Delta T/b) \quad (2.1.1)$$

donde:

Q_c = flujo de calor por conducción (W)

k = conductividad Térmica W/(m °C)

A = área a través de la cual se realiza la conducción (m²)

ΔT = diferencia de temperatura (°C)

b = espesor del material (m)

Convección

La convección se puede definir de dos maneras, ya sea como a) la forma de la transferencia de calor de la superficie de un cuerpo sólido a un fluido (que puede ser líquido o gas), o como b) el transporte de calor en un fluido por movimiento de sus moléculas de un punto a otro.

En el primer caso, se puede hacer referencia a la transferencia de calor que ocurre entre un muro y el aire (fig. 2.1.2). En general, la proporción de transferencia de calor por convección dependerá directamente de la velocidad a la que circule el fluido, es decir, a mayor velocidad del fluido, mayor será la proporción de la transferencia de calor.

Comúnmente, la transferencia de calor por convección se clasifica en dos tipos: convección natural o libre y convección forzada. La convección natural es el resultado de la diferencia de densidades en el fluido, causada por una diferencia de temperatura, mientras que la convección forzada ocurre cuando una fuerza externa (por ejemplo, un ventilador o algún otro medio mecánico) produce el movimiento del fluido.

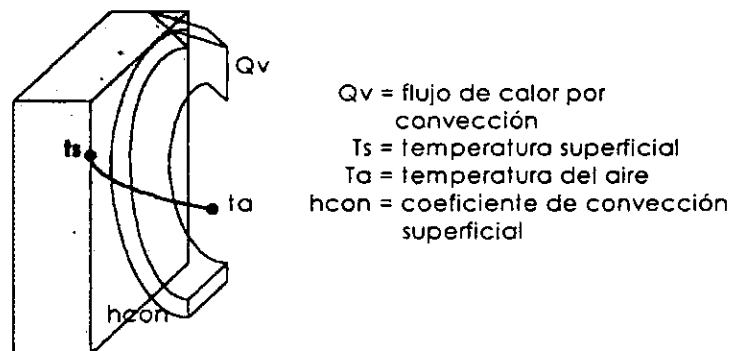


Figura 2.1.2. Convección entre el aire y una superficie sólida.

Debido a la complejidad para poder explicar matemáticamente la convección en las superficies constructivas, se ha optado por utilizar la ley de Newton del enfriamiento, que representa una aproximación práctica para realizar los cálculos tanto de convección forzada como de convección libre o natural. Dicha ley establece que la proporción a la cual se transfiere el calor por convección es directamente proporcional a la diferencia de temperatura y al área de transferencia de calor. La ecuación que expresa la ley de Newton del enfriamiento es:

$$Q_v = h_{con} A \Delta T \quad (2.1.2)$$

donde:

Q_v = flujo de calor por convección (W)

h_{con} = coeficiente de convección (W/m² °C)

A = área de la superficie a través de la cual ocurre la convección (m²)

ΔT = diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido (°C)

El valor del coeficiente de convección h_{con} , depende de varios aspectos como la viscosidad y velocidad del fluido (en este caso, el aire), así como de la configuración física de la superficie, la cual determinará si el flujo del aire es laminar o turbulento. Por otra parte, como la velocidad del aire varía de acuerdo a su cercanía con la superficie, el valor del coeficiente h_{con} varía también de un punto a otro.

La dificultad para explicar matemáticamente este tipo de fenómenos ha provocado que generalmente se le asignen valores promedio al coeficiente de convección de acuerdo a la ubicación de la superficie

y a la dirección del flujo, sin embargo, éstos valores pueden diferir considerablemente de un autor a otro.

En el segundo caso, el término de convección se aplica a las ganancias o pérdidas de calor de un espacio debidas al intercambio de aire entre el interior y el exterior, ya sea por infiltración o por ventilación deliberada. Según Fuentes³, la magnitud del flujo de calor por convección, debido a la ventilación, se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Q_v = 1200 V \Delta T \quad (2.1.3)$$

donde:

Q_v = flujo de calor por convección (W)

1200 = calor específico volumétrico del aire (J/m³°C)

V = ventilación (m³/s), y

ΔT = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del espacio (°C)

RADIACIÓN

La radiación es la transferencia de la energía a través de ondas electromagnéticas, las cuales se clasifican según su longitud de onda. En este caso, el flujo de la energía no requiere de algún material para su transporte.

El espectro de la longitud de onda de la radiación emitida por un objeto, depende de su temperatura. Debido a esto, la radiación térmica terrestre, consiste en una radiación infrarroja de onda larga, pues

es emitida a una baja temperatura, comparada con la radiación solar, que se caracteriza por una radiación de onda corta.

Todos los objetos radian energía constantemente. La cantidad de esta energía depende de la temperatura de la superficie radiante y de su emisividad. La Ley de Stefan-Boltzmann establece que el flujo de calor emitido por un radiador perfecto, llamado cuerpo negro, es proporcional a la temperatura absoluta (en unidades Kelvin o grados Rankine) a la cuarta potencia. La constante de proporcionalidad (σ) es llamada la constante de Stefan-Boltzmann. En términos matemáticos, la ley de Stefan-Boltzmann es determinada por la siguiente ecuación:

$$q = \sigma T^4 \quad (2.1.4)$$

donde:

q = flujo de energía calorífica (W/ m²)

σ = constante de Stefan-Boltzmann = 5.669×10^{-8} W/(m² K⁴)

T = Temperatura absoluta (K)

La cantidad de energía radiante que recibe un objeto depende, en términos generales de:

- a) La distancia a la fuente de energía
- b) El ángulo de incidencia de la radiación
- c) la temperatura del cuerpo emisor y la del receptor y
- d) las cualidades de absorptancia (α) y emitancia (ϵ) de las superficies.

Cuando la energía radiante incide sobre un cuerpo, ésta es absorbida, reflejada y/o transmitida a través del material. La conservación de la energía requiere que la suma de estas tres propiedades sea la unidad (ver fig. 2.1.3):

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (2.1.5)$$

El flujo de calor por radiación se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q_r = hr A \Delta T \quad (2.1.6)$$

donde:

Q_r = flujo de calor por radiación	(W)
hr = coeficiente de radiación	(W/m ² °C)
A = área expuesta	(m ²) , y
ΔT = diferencia de temperatura	(°C)

El valor del coeficiente de radiación (hr) depende tanto del valor de emitancia de las superficies, como de la temperatura de las mismas. Para superficies de construcción normales, Szokolay⁶ propone los siguientes valores:

$$hr = 5.7 \epsilon \text{ (para una temperatura superficial de } 20^\circ\text{C), y}$$

$$hr = 4.6 \epsilon \text{ (para una temperatura superficial de } 0^\circ\text{C)}$$

donde:

$\epsilon = 0.9$ para materiales de construcción comunes*,

$\epsilon = 0.2$ para aluminio opaco,

$\epsilon = 0.05$ para aluminio pulido.

* El valor de la emitancia de los materiales más comunes en la construcción oscila alrededor de 0.9, por lo que éste valor ha sido considerado válido por varios autores (Szokolay⁶, 1980; Kreider⁷, 1994).

Cuando se conoce la densidad del flujo radiante incidente (G), el calor absorbido por la superficie será:

$$Q_r = A G \alpha \quad (2.1.7)$$

y para superficies vidriadas:

$$Q_r = G A f_g \quad (2.1.8)$$

donde:

Q_r = Flujo de calor por radiación (W)

A = superficie expuesta (m^2)

G = densidad de la energía radiante incidente (W/m^2)

α = absorptancia del material

f_g = factor de ganancia solar

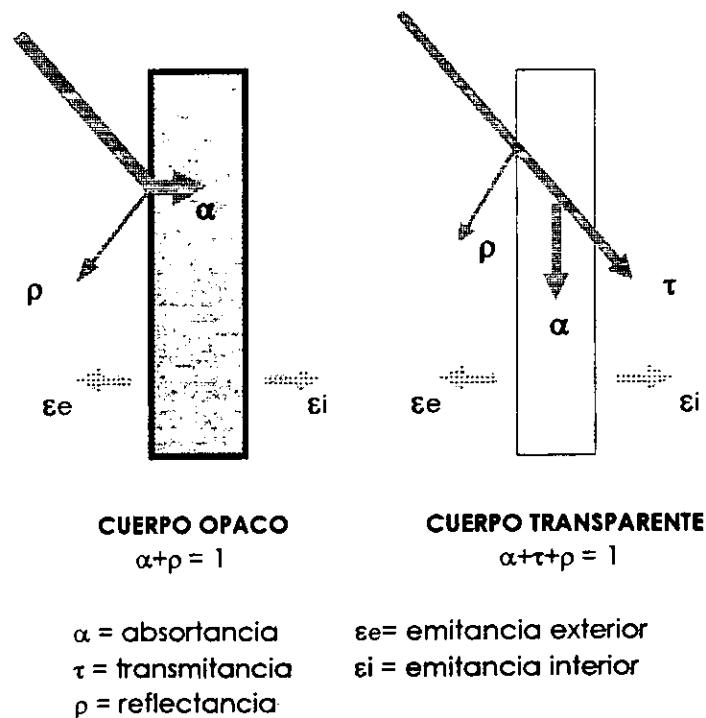


Figura 2.1.3. Características de los cuerpos al recibir la radiación.

El factor de ganancia solar (fg), es la suma de la radiación transmitida, mas la proporción de la energía absorbida que se remite al interior:

$$fg = \tau + \epsilon i \quad (2.1.9)$$

aunque en general se puede calcular como:

$$fg = \tau + (\alpha/2) \quad (2.1.10)$$

Transmisión

Al analizar la transferencia de calor entre el aire y un cuerpo, o viceversa, es conveniente combinar las componentes radiantes y convectivas en un sólo coeficiente de conductancia superficial (f) :

$$f = hr + hc \quad (W/m^2{}^{\circ}C) \quad (2.1.11)$$

El recíproco de ésta conductancia superficial, es la resistencia superficial (1/f), la cual se puede agregar a las resistencias de cada una de las capas de conformen un elemento (un muro, por ejemplo - ver fig. 2.1.4-), obteniendo así la resistencia total :

$$R = \frac{1}{f_i} + R_t + \frac{1}{f_e} = \frac{1}{f_i} + \frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2} + \dots + \frac{b_n}{k_n} + \frac{1}{f_e} \quad (2.1.12)$$

donde:

R = resistencia total

1/f_i = resistencia superficial interior

R_t = resistencia del objeto o elemento

1/f_e = resistencia superficial exterior

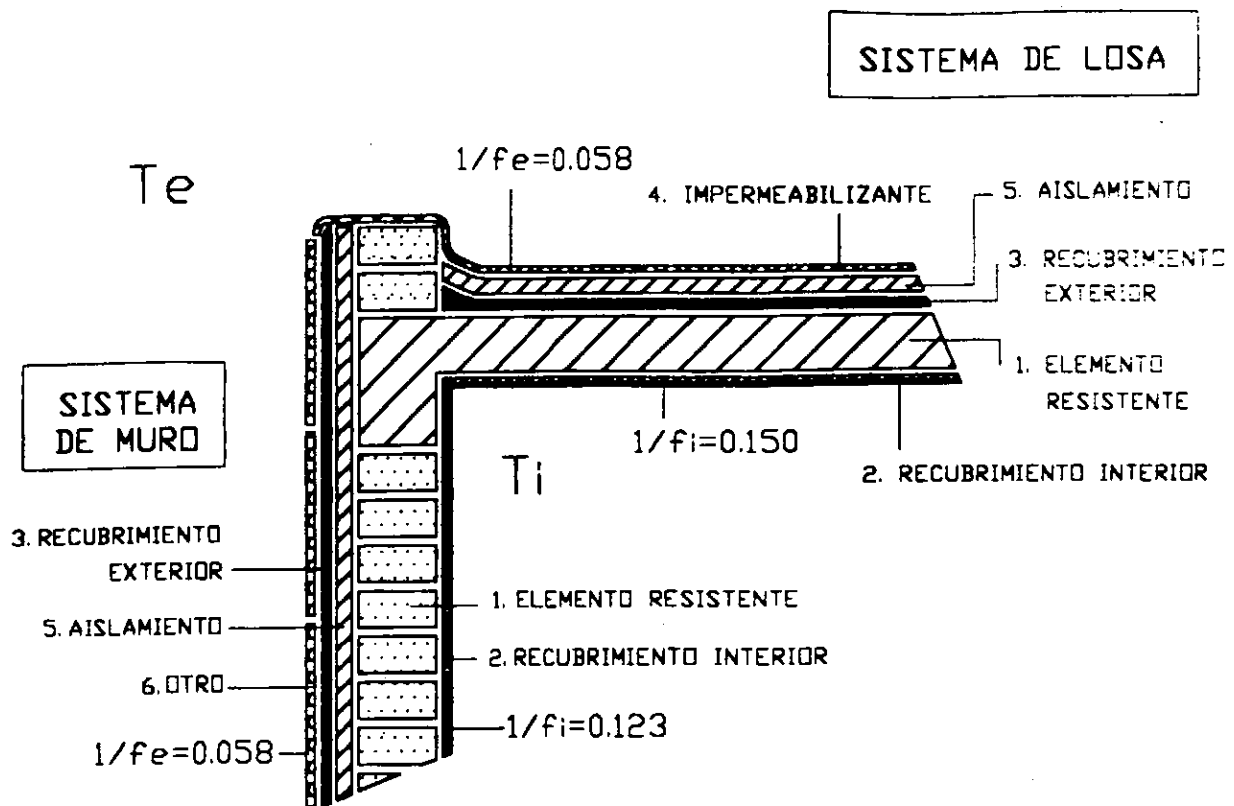


Figura 2.1.4. Sistemas de techo y muro de una edificación, compuesto por varias capas homogéneas.
(Tomada de la propuesta de la norma NOM-008-ENER-1995).

El inverso de la resistencia es el valor U , también conocido como el coeficiente global de transferencia de calor, con el cual se puede determinar que el flujo de energía calorífica por conducción a través muros u otros elementos constructivos será:

$$Q_c = A U \Delta T \quad (2.1.13)$$

donde:

$$\Delta T = T_e - T_i$$

T_e = Temperatura del aire exterior

T_i = Temperatura del aire interior

Bajo estos términos, cuando Q_c tenga valor negativo, querrá decir que existe una pérdida de calor, y cuando haya un incremento en la temperatura, el valor será positivo.

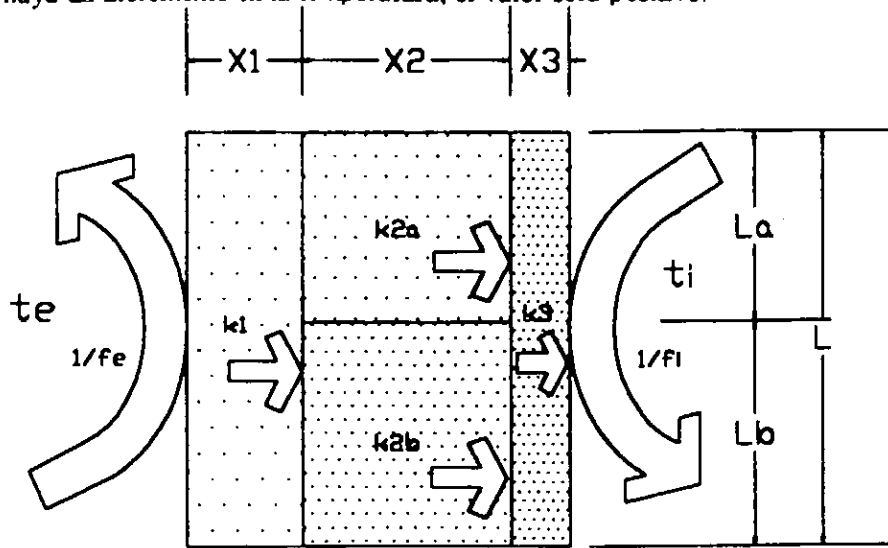


Figura 2.1.5. Coeficiente global de transferencia de calor; valor "U", de sistemas de techos y muros de una edificación formados por capas homogéneas y capas no homogéneas.
(Tomada de la propuesta de la norma NOM-008-ENER-1995).

Cuando un elemento constructivo se compone por capas térmicamente homogéneas y capas térmicamente no homogéneas, paralelas a la superficie, es necesario considerar las conductancias de los elementos diferentes (ver fig. 2.1.5). En este caso, el valor "U" del elemento constructivo se puede calcular de la siguiente manera⁸:

$$U_t = \left\{ \left(\frac{1}{R_a} \right) \left(\frac{L_a}{L} \right) \right\} + \left\{ \left(\frac{1}{R_b} \right) \left(\frac{L_b}{L} \right) \right\} \quad (2.1.14)$$

donde:

U_t = Valor ponderado de la conductancia total del sistema de techo o muro. (W/m² K)

L_a = Ancho de la sección formada con capas homogéneas distintas a la sección (b). (m)

L_b = ancho de la sección formada con capas homogéneas distintas a la sección (a). (m)

R_a = Valor de la Resistencia térmica total del sistema en la sección (a)

R_b = Valor de la Resistencia térmica total del sistema en la sección (b)

2.2 Control Térmico

El comportamiento térmico de los edificios está en función tanto de las características del medio ambiente, como de las actividades que se desarrollan dentro de los mismos. Esto hace necesario realizar un estudio de los flujos de energía que existen a través de la estructura de un edificio, no sólo de la envolvente, sino también entre los distintos espacios que conforman su interior, pues puede ser que el tipo de actividades que en él se desarrollen requieran distintas condiciones ambientales, ya sea de mayor o menor temperatura, o de mayor o menor humedad, y si no se tiene el cuidado necesario en el diseño de los espacios y en la elección de los materiales de construcción, las condiciones ambientales pueden salirse de los rangos considerados como ideales, trayendo como consecuencia una posible deficiencia en la productividad, en la eficiencia y/o confort de los usuarios, o el incremento en el consumo de energía eléctrica debido a la necesaria instalación de equipos que puedan proporcionar las condiciones requeridas. Lo más conveniente para lograr un adecuado consumo de energía, es lograr acondicionar térmicamente los espacios de manera pasiva, evitando el uso de equipos electromecánicos que acondicionen el ambiente artificialmente, sin embargo, no siempre es posible el control natural, pues existen regiones donde las condiciones climáticas son muy severas y obligan al empleo de sistemas activos que proporcionen las condiciones de confort. No obstante, aún en estos casos es posible disminuir la carga térmica de manera importante.

2.2.1 Balance Térmico

Para poder saber si en una edificación van a existir las condiciones térmicas ideales para desarrollar las actividades para las que está diseñada, o si va a ser necesaria la instalación de equipos electromecánicos que generen estas condiciones, es necesario realizar un balance térmico.

El balance térmico consiste en la suma de todas las cargas térmicas que intervienen en una edificación (ver fig. 2.2.1), con el propósito de determinar si existe o no, un incremento o decremento en la temperatura.

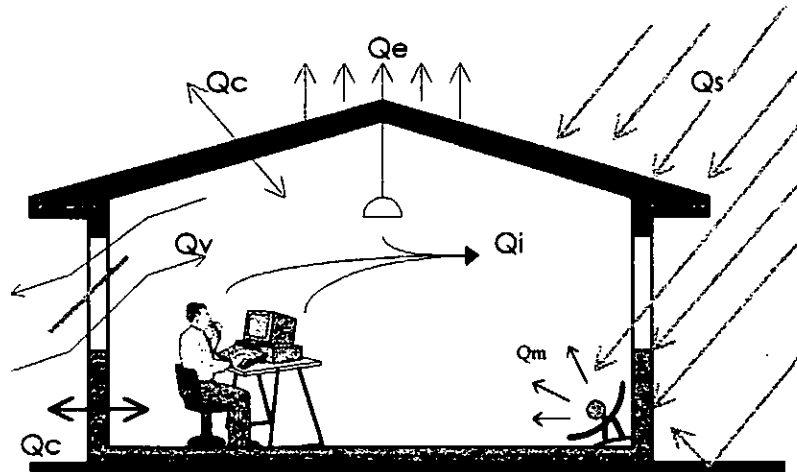


Fig. 2.2.1. Cargas Térmicas en una edificación.

Cuando las ganancias de calor de un espacio, producidas por los flujos de energía a través de la estructura son iguales a las pérdidas de calor, se dice que existe un equilibrio térmico. En otras palabras, habrá un equilibrio térmico, cuando la suma de todos los flujos de calor que existen en un espacio sea igual a cero:

$$Q_s + Q_i \pm Q_c \pm Q_v \pm Q_m - Q_e = 0 \quad (2.2.1)$$

donde:

Q_s = ganancias por radiación solar directa

Q_i = ganancias de calor internas.

Q_c = ganancias o pérdidas de calor por conducción.

Q_v = ganancias o pérdidas de calor por ventilación o infiltración.

Q_m = calentamiento o enfriamiento mecánico.

Q_e = pérdidas de calor por enfriamiento evaporativo.

Si la suma de todos los flujos de calor da como resultado un valor positivo, la temperatura del espacio aumentará, y si la suma genera un valor negativo, habrá un decremento de temperatura.

2.2.2 Inercia Térmica

Dadas las características termofísicas de los materiales que componen la envolvente de un espacio, así como la variación de temperatura del exterior en un período de 24 hrs., para que el calor fluya del exterior al interior, primero debe pasar a través de la envolvente y una vez que ésta ha alcanzado la temperatura exterior, el calor fluirá hacia el interior. Para que este proceso se complete, es necesario cierto lapso de tiempo, durante el cual la temperatura exterior puede tener variaciones. Si se graficaran simultáneamente las temperaturas del interior con las del exterior durante un período de 24 hrs., se observarían dos curvas muy semejantes ligeramente desfasadas en sus crestas y con una amplitud diferente (ver fig. 2.2.2). El desfasamiento que resulta entre las dos crestas se conoce como retardo térmico y la relación que existe entre las dos amplitudes se denomina amortiguación.

Cuando un material produce un gran retardo térmico y amortiguamiento, se dice que tiene una alta inercia térmica, y viceversa, si un material produce poco retardo térmico y poco amortiguamiento, se considera con una baja inercia térmica.

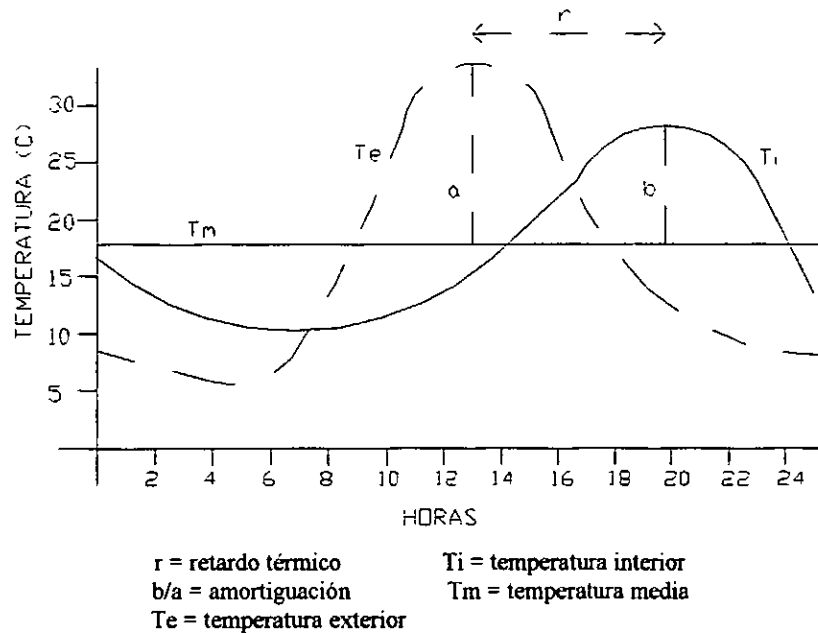


Fig. 2.2.2. Representación Gráfica del Retardo Térmico y la Amortiguación.

El cálculo del retardo térmico y del amortiguamiento está en función de la velocidad de difusión, de la conductividad térmica del material, de su calor específico, de su densidad y de su espesor, e implica el desarrollo de una serie de ecuaciones muy complejas, debido a lo cual, algunas metodologías simplifican el problema suponiendo que el flujo de calor es instantáneo y en una sola dirección, con el afán de hacer más prácticos los cálculos.

2.3 Métodos de Cálculo Térmico

La gran complejidad para poder explicar matemáticamente los fenómenos térmicos que ocurren en una edificación, han generado la necesidad de crear una serie de hipótesis y suposiciones que

simplifiquen, en mayor o menor grado, su comprensión, de tal manera que su cálculo pueda llevarse a cabo de una manera práctica y lo más sencillamente posible. Como consecuencia, hoy en día existe una gran cantidad de métodos con diferentes características y alcances, que pueden ser empleados eficientemente dependiendo de las necesidades del usuario.

La ASHRAE⁹, ha clasificado los distintos métodos de cálculo térmico, de acuerdo a su complejidad en : Métodos en Estado Permanente, Métodos de Correlación, Métodos Dinámicos y Métodos de Simulación.

2.3.1 Métodos en Estado Permanente

Los cálculos en estado permanente, también llamados de *régimen estacionario*, o *régimen estable*, son los más sencillos de todos, pues en ellos se considera que el flujo de calor se lleva a cabo de manera instantánea, en una sola dirección y bajo condiciones permanentes de los factores que intervienen en el comportamiento térmico del edificio, despreciando así, la inercia térmica de los materiales.

Estos métodos son apropiados cuando las condiciones de uso del espacio son constantes, pero cuando las ganancias internas varían, es más conveniente el uso de otros métodos, pues si bien se ha demostrado que para periodos hasta de 24 hrs. pueden tener resultados bastante aceptables en climas templados¹⁰, para climas extremosos, donde la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas diarias es muy amplia, se puede llegar a tener un error de mas del 100%⁶.

2.3.2 Métodos de Correlación

Los métodos de correlación han sido desarrollados para simplificar el cálculo de la carga térmica cuando la dimensión de los espacios es muy grande (por ejemplo en edificios o establecimientos comerciales), pues en los métodos permanentes es necesario dividir el espacio en varias zonas térmicas y calcular una por una. Como estos cálculos deben ser estimados para la temperatura de cada espacio y pueden ser repetitivos en varias ocasiones, los métodos de correlación, relacionan los requerimientos de energía a varios parámetros de las entradas. Las correlaciones generalmente se hacen caracterizando muchos análisis detallados y usando medios estadísticos para reducir los resultados a una forma simple.

La certeza de los métodos de correlación depende del tamaño y la veracidad de la base de datos y del uso de estadísticas apropiadas para desarrollar la correlación.

2.3.3 Métodos Dinámicos

Los modelos dinámicos consideran los continuos cambios de todos los factores, tanto interiores como exteriores, que determinan las cargas térmicas dentro de un edificio, de tal manera que se pueden obtener estimaciones horarias de la carga térmica para varios días tipo en distintas épocas del año, e incluso, una estimación del consumo energético anual.

Los modelos matemáticos usados por estos métodos, deben representar a) el comportamiento térmico de la estructura del edificio, b) el comportamiento termodinámico del sistema de distribución de aire

acondicionado, y c) la relación matemática de las cargas contra los requerimientos de energía del equipo.

Cabe mencionar que el uso de éstos métodos se limita principalmente a la comparación de distintas alternativas de diseño, en las que la exactitud de las predicciones del consumo energético no son muy importantes, pues la gran cantidad de factores que no se pueden calcular o conocer, con frecuencia los inhabilita en ese sentido.

En la figura 2.3.1 se muestra el funcionamiento básico de los elementos que utilizan la mayoría de los modelos dinámicos⁹, donde se observa que el módulo donde se calculan las cargas térmicas, depende en primer término de los datos de clima y las cargas internas, los cuales son proporcionados por el usuario. Una vez calculadas las cargas, se calcula el dimensionamiento de los sistemas de aire acondicionado y se regresa al módulo de cargas para estimar el comportamiento térmico incluyendo la operación de los sistemas. El modelo de la planta opera de manera similar al de sistemas pero se usa para estimar la demanda de otros energéticos. Finalmente se estima el consumo total de energía y su respectivo costo, ya sea de manera cíclica o anual.

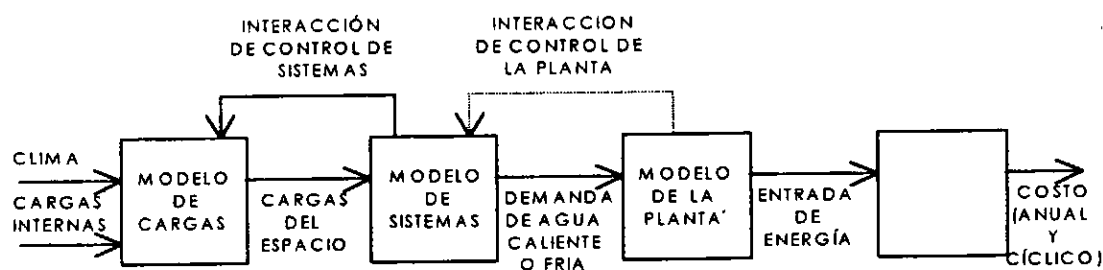


Fig. 2.3.1 Diagrama de flujo para calcular las cargas de enfriamiento o calentamiento usando los algoritmos de la ASHRAE⁹.

2.3.4 Métodos de Simulación

En los métodos de simulación detallada, se considera el paso del tiempo durante la simulación y los efectos que este tiene en los fenómenos termodinámicos de la edificación. La gran complejidad para poder desarrollar las ecuaciones que expliquen este tipo de fenómenos, hace necesario que la aplicación de estos métodos sea posible únicamente mediante el empleo de una computadora.

Hoy en día, gracias a los avances en la computación, existe una gran cantidad de programas que permiten simular distintas características de sistemas solares activos, pasivos y/o híbridos, pero es necesario saber para qué casos puede ser aplicable cada programa, pues existen programas de simulación solar, que únicamente son aplicables para estudios de sistemas solares activos, donde los elementos activos pasan a segundo término, y programas de simulación detallada para aplicaciones en sistemas solares pasivos y/o híbridos, en los que el detalle de la transferencia de energía entre los muros y los cuartos es importante, o para sistemas activos y casos multizonaes donde la simulación de los sistemas de aire acondicionado está en primer término.

Los programas de simulación detallada pueden ser empleados para diseñar o para realizar análisis energéticos y en algunos casos, para análisis de equipos de aire acondicionado.

Este tipo de programas tiene algunas desventajas, como la complejidad de sus entradas, la cantidad de tiempo necesario para correrlos, los altos costos y los requerimientos de saber como usarlos para lograr simulaciones acertadas. Entre sus ventajas está la incorporación de una gran variedad de tipos de sistemas y la flexibilidad para hacer estudios de optimización, y aunque la ASHRAE⁹ menciona su

capacidad para simular acertadamente los detalles de sistemas complejos, se ha demostrado en diversos estudios comparativos^{11,12} y experimentales¹³, que en determinados casos, las salidas de algunos programas difieren mucho del rango general de la mayoría de los modelos, e incluso, que algunas metodologías de estado permanente pueden ser más acertadas que ciertos programas de simulación en estado transitorio^{10,14}.

2.4 Métodos para dar Validez a los Modelos de Simulación Térmica de Edificios

Actualmente existe una gran cantidad de programas de simulación térmica de edificios, la mayoría de los cuales han sido desarrollados principalmente en los Estados Unidos y Europa. En un estudio realizado en 1985 entre los países de la Agencia de Energía Internacional (IEA) se encontraron 215 programas distintos¹, algunos de los cuales ya han salido del mercado y otros nuevos se han incorporado. La magnitud de los problemas que puede solucionar cada uno de ellos varía considerablemente, así como su estructura, su filosofía y la precisión de sus resultados. Incluso el programa más detallado contiene muchas suposiciones simplificadas, errores y fallas que en algunos casos traen como consecuencia desaciertos significativos en sus predicciones¹. La gran diversidad de los modelos de simulación térmica, ha generado la necesidad de evaluar, desde distintos enfoques, las características de cada uno de ellos, con el propósito de determinar tanto la certeza como los alcances que se pueden tener en su aplicación.

Con este fin, se han determinado distintas metodologías que permiten, para diferentes circunstancias y dependiendo de los intereses particulares, dar validez a los programas, aunque se ha argumentado que la verificación absoluta es prácticamente imposible¹³.

Dentro de este ámbito, Judkoff¹, menciona tres maneras de evaluar la exactitud de los programas de simulación:

- **Validación Empírica**, en la cual a) los resultados calculados por un programa son comparados con los datos de un monitoreo de una estructura real, o b) los resultados intermedios de un algoritmo o subrutina son comparados con los datos de laboratorio.
- **Verificación Analítica**, en la cual, las salidas de un programa, subrutina o algoritmo es comparada con el resultado de una solución analítica conocida para mecanismos de transferencia de calor aislados bajo límites muy simples.
- **Prueba Comparativa**, en la cual un programa se compara consigo mismo o con otros programas que pueden ser considerados como más válidos o más detallados y presumiblemente, más correctos físicamente.

Bloomfield¹⁵, por su parte, agrega un método más:

- **Chequeo de Códigos**, en el cual, además de revisar los códigos, se revisan también las bases teóricas de los programas, involucrando también a los autores, o preferentemente, a terceras personas. Aunque este método debe ser más bien una parte integral del desarrollo del programa.

Algunas de las ventajas y desventajas de estos métodos de validación se muestran en la siguiente tabla.

TÉCNICA DE EVALUACIÓN	VENTAJAS	• DESVENTAJAS
VERIFICACIÓN EMPÍRICA	• ES APLICABLE A LA REALIDAD • SE PUEDE SIMULAR PRÁCTICAMENTE CUALQUIER NIVEL DE COMPLEJIDAD • SE PUEDE OBSERVAR LA APROXIMACIÓN ENTRE LAS SALIDAS DE LOS PROGRAMAS Y LA REALIDAD	• EL MONITOREO INVOLUCRA CIERTA INCERTIDUMBRE EN EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS • LOS MONITOREOS DETALLADOS PARA OBTENER DATOS DE CALIDAD SON MUY COSTOSOS Y DEMANDAN MUCHO TIEMPO
VERIFICACIÓN ANALÍTICA	• NO HAY INCERTIDUMBRE EN LAS ENTRADAS • SE PUEDE COMPARAR CON LA REALIDAD	• NO ES POSIBLE EVALUAR EL PROGRAMA EN SU TOTALIDAD • SE LIMITA A LOS CASOS PARA LOS QUE EXISTEN SOLUCIONES ANALÍTICAS CONOCIDAS
PRUEBAS COMPARATIVAS	• NO HAY INCERTIDUMBRE EN LAS ENTRADAS • SE PUEDE SIMULAR CUALQUIER NIVEL DE COMPLEJIDAD • EL COSTO ES REDUCIDO • ES FÁCIL Y SE PUEDEN HACER UN GRAN NÚMERO DE SIMULACIONES	• NO ES POSIBLE SABER SI LAS SALIDAS CORRESPONDEN A LA REALIDAD
CHEQUEO DE CÓDIGOS	• PUEDE ASEGURAR QUE LA ENTRADA DE DATOS ES CONFIABLE	• NO HAY NINGÚN PARÁMETRO QUE INDIQUE LA EXACTITUD DEL PROGRAMA

Tabla 2.4.1 Ventajas y Desventajas de Distintas Técnicas de Validación.
(Basado en la tabla de comparación de Eppel¹³).

2.5 Estudios Previos para la Validación de Modelos de Simulación Térmica de Edificios

Tomando como base las técnicas de validación mencionadas anteriormente, se han realizado estudios con varios programas de los que se pueden considerar como los más aceptados a nivel mundial. Los niveles de análisis, el número de programas y la cantidad de variables que se han considerado difieren en cada estudio, así como los alcances de cada uno de ellos.

En el presente trabajo, se muestran las observaciones realizadas en algunas investigaciones de acuerdo al método de validación utilizado. Dado que no se encontró ningún estudio de verificación analítica, se presentan únicamente los estudios de pruebas comparativas y de verificación empírica que se han detectado.

2.5.1 Pruebas Comparativas

Puede decirse que en las pruebas comparativas que se analizaron, independientemente de los programas que se contemplan o de los alcances que se pretendían, partieron de las mismas bases de comparación:

- un edificio hipotético, de una geometría sencilla, con la posibilidad de modificar algunas características para evaluar la sensibilidad de los modelos a diferentes parámetros;
- masividad y ligereza para cada una de las características contempladas; y
- datos de climas bien definidos que permitieran interpretar las salidas de los programas claramente.

Bajo estas consideraciones se pueden mencionar dos trabajos importantes, uno de ellos desarrollado en 1995 por Judkoff y Neymark¹ y el otro, realizado en 1996 por Bansal y Bhandari¹² durante el desarrollo del programa ADMIT.

En el primero de ellos, Judkoff y Neymark desarrollaron un procedimiento de evaluación al que llamaron BESTEST¹ (Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method), basado en el análisis comparativo de varios programas que se pueden considerar entre los mejores del mundo, figurando principalmente: TRNSYS, DOE-2, BLAST, ESP y SERI-RES.

El objetivo de este estudio fue desarrollar un procedimiento que permitiera la evaluación sistemática de los modelos de simulación térmica de edificios y diagnosticar las fuentes de desacuerdos predictivos, logrando establecer una serie de parámetros de comparación basados en las salidas de los programas que se pueden considerar como el *estado del arte* en los Estados Unidos y Europa.

Algunos puntos considerados particularmente para este estudio fueron los siguientes:

- Las especificaciones de propiedades térmicas, proporciones geométricas, etc., corresponden a especificaciones constructivas comunes para Estados Unidos y Europa.
- No se definieron casos en los que se requiriera la simulación de sistemas mecánicos.
- Todos los modelos se corrieron en sus modalidades más detalladas.
- Para todos los casos se utilizaron los datos horarios del clima de Denver, CO., caracterizado por inviernos fríos, veranos cálidos y secos, y grandes variaciones de temperatura a lo largo del día durante todo el año.

Tomando en cuenta que los alcances de los programas varían ampliamente, se hicieron comparaciones a distintos niveles que permitieran evaluar todos los aspectos para los cuales son aptos cada uno de los modelos. Características como las cargas térmicas anuales, las temperaturas máximas y mínimas anuales, las cargas pico y algunos datos horarios pudieron ser comparados de forma sistemática para posteriormente elaborar un diagnóstico determinando los algoritmos que pudieran ser los causantes de las diferencias predictivas.

Como resultado final, se obtuvieron parámetros con los cuales es posible comparar un programa de simulación térmica y determinar bajo qué circunstancias puede resultar apropiada su aplicación. También se detectaron fallas en algunos algoritmos, las cuales fueron notificadas a los autores de los programas para sus respectivas correcciones.

El edificio tomado como base de estudio en esta investigación se muestra en la figura 2.5.1, y como se ha mencionado, era de una geometría muy sencilla a la cual se le realizaron algunas modificaciones para analizar diferentes características de los modelos de simulación. A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos en este estudio y se mencionan algunos aspectos de los programas. Las gráficas que se presentan más adelante aparecen en función de las cargas térmicas anuales.

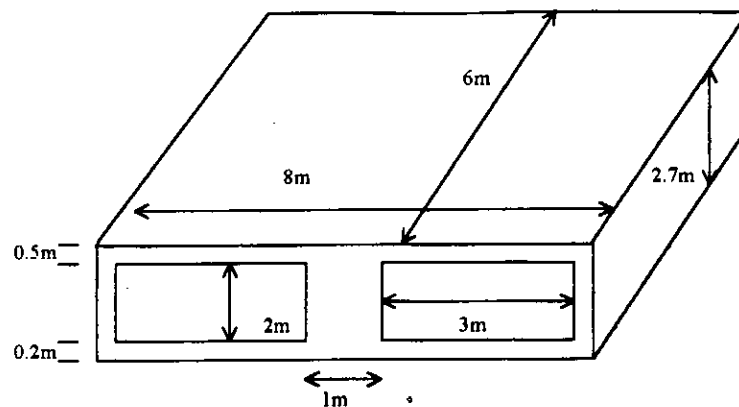


Figura 2.5.1 BESTEST. Edificio base (hipotético): ventanas orientadas al sur, sin sombrear.

TRNSYS. TRNSYS es considerado como el programa más avanzado para la simulación de sistemas solares activos patrocinado por el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos. En el análisis realizado, los resultados de la versión 12.2v1, diferían notablemente de los resultados de los otros programas para los casos que implicaban una alta capacitancia térmica. Este caso es visible en la figura 2.5.2, en la cual se observan las demandas de energía de varios programas para el calentamiento anual bajo diversas características en los edificios de alta masividad; resaltan cuatro casos donde las salidas de TRNSYS se disparan con respecto a las de los otros modelos. Al analizar los efectos de la masa térmica en las cargas de calentamiento y enfriamiento anuales, en la figura 2.5.3 se puede ver que, con diferentes características, las demandas de TRNSYS son muy pequeñas en relación al resto de los modelos. En base a esto se confirmó que el algoritmo que provocaba el problema estaba relacionado con el cálculo de la masa térmica y de acuerdo a los autores, esta falla ha sido corregida en las versiones posteriores de TRNSYS.

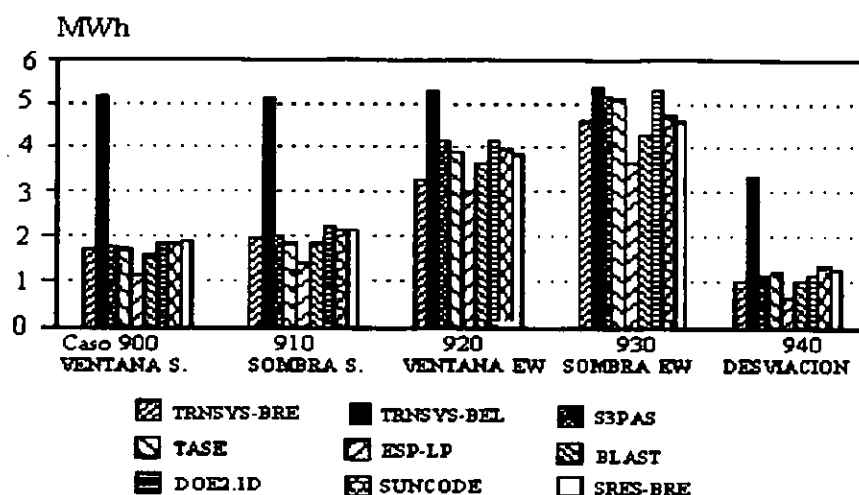


Figura 2.5.2. Evaluación BESTEST: demanda de energía para calentamiento anual, edificio con alta masividad (Fuente: Judkoff y Neymark, 1995)¹.

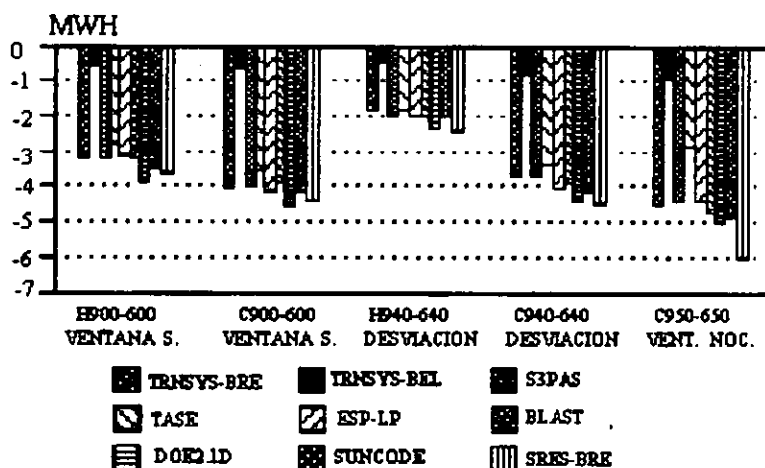


Figura 2.5.3. Evaluación BESTEST: efecto de la masa térmica en la carga anual de calentamiento y enfriamiento (Fuente: Judkoff y Neymark, 1995)¹.

DOE-2. El programa DOE-2 es considerado como el programa más avanzado de los programas patrocinados por DOE, y es la base técnica para determinar los códigos y estándares nacionales de

energía en los edificios de los Estados Unidos. Las pruebas en DOE-2 detectaron un problema en la versión 2.1D014, relacionado con el tratamiento de la absorptividad de las superficies exteriores. Esto se puede ver en la figura 2.5.4, donde las salidas de la carga de enfriamiento anual de DOE-2, parecen menos sensibles a los cambios en la absorptividad solar exterior (0.1 a 0.9) que los otros programas. La falla ya ha sido reparada en las versiones posteriores de DOE-2.

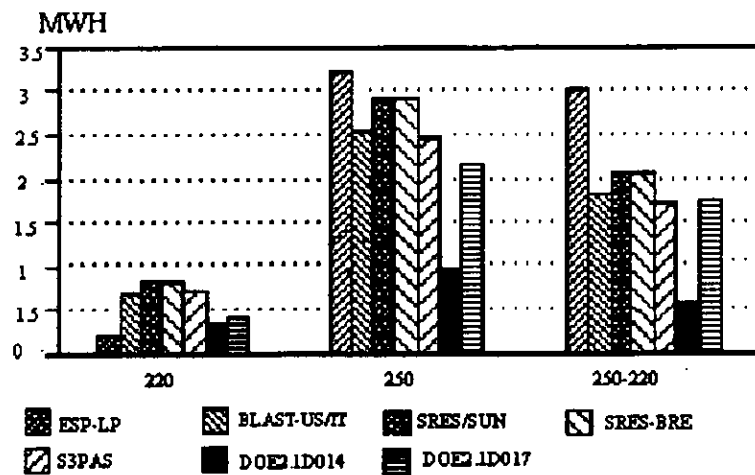


Figura 2.5.4. Evaluación BESTEST: efecto de la absorptividad de onda corta en la carga anual de enfriamiento (Fuente: Judkoff y Neymark, 1995) ¹.

BLAST. BLAST es el programa usado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para el mejoramiento de la eficiencia energética en sus edificios. BLAST tiene la particularidad de permitir que la emisividad infrarroja de todos los materiales pueda ser variable. En este caso, la prueba realizada para radiación infrarroja exterior reveló que no hay sensibilidad al cambio en la emisividad infrarroja exterior de 0.1 a 0.9, lo cual se observa en la figura 2.5.5, al compararlo con las salidas de los demás programas analizados. El algoritmo responsable fue reportado a la oficina de soporte de BLAST.

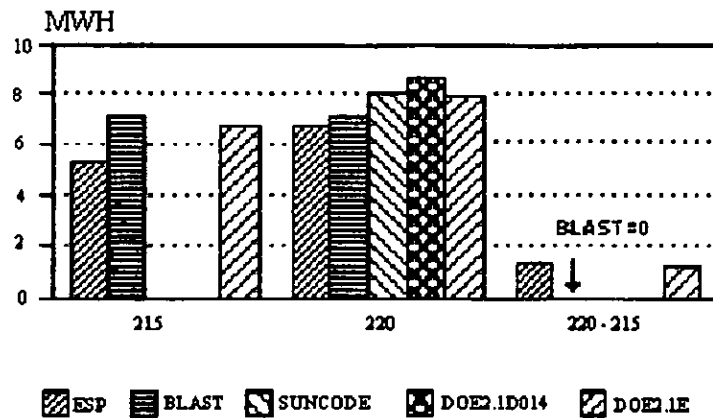


Figura 2.5.5. Evaluación BESTEST: efecto de la emisividad en la carga anual de calentamiento (Fuente: Judkoff y Neymark, 1995) ¹.

ESP. ESP (Environmental Systems Performance) fue desarrollado por la Unidad de Investigación de Simulación de energía (ESRU) en la Universidad de Strathclyde en Glasgow y es el programa que ha sido seleccionado por el área de investigación del Consejo de Comunidades Europeas (CEC) como su programa de referencia para la investigación de la energía en edificios. Al realizar las pruebas de la estimación de cargas anuales de calentamiento, ESP presentó salidas muy bajas con respecto a las salidas de la mayoría de los modelos analizados (ver figura 2.5.6). Esta deficiencia se debió a un problema con la absorción solar interior, siendo posible que el grupo responsable del desarrollo de ESP detectara y corrigiera el algoritmo correspondiente.

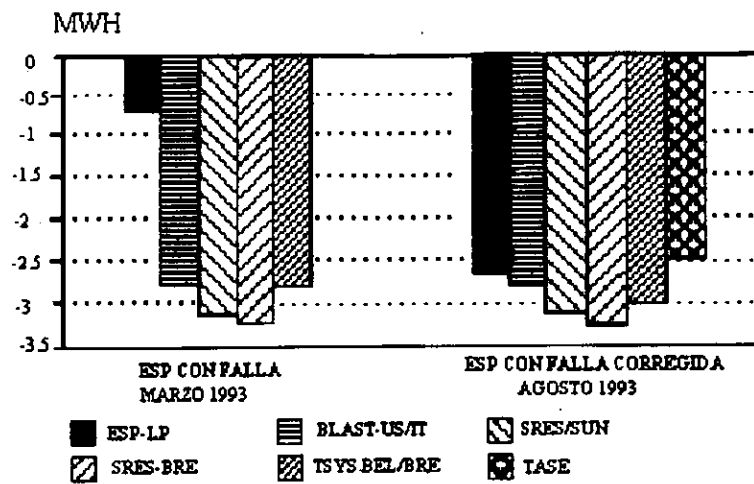


Figura 2.5.6 Evaluación BESTEST: carga de enfriamiento anual
(Fuente: Judkoff y Neymark, 1995)¹.

Posteriormente, **Bansal y Bhandari**¹², durante el desarrollo de un programa (ADMIT) que permitiera la incorporación de conceptos pasivos, especialmente para enfriamiento, realizaron otro estudio comparativo con los programas TRNSYS, SUNCODE y ADMIT.

Las características particulares de esta comparación se enfocaron principalmente a los datos climáticos:

- Se consideraron tres zonas climáticas diferentes de la India: una zona cálida y seca (Jodhpur), una zona fría y soleada (Leh) y una zona intermedia (Nueva Delhi).
- Las simulaciones se realizaron para un día representativo (24 hrs.) de cada uno de ellos; y
- Se determinaron dos espacios, uno de mayor volumen que otro.

Se pudo observar que para el caso de construcciones ligeras, sin ventanas, los resultados de los diferentes programas son muy similares, mientras que para los casos donde se tienen muros y losas masivos y compuestos de varias capas, las salidas de los programas varían significativamente. Los resultados fueron prácticamente los mismos cuando se modificó el volumen del espacio.

Las observaciones hechas al realizar el análisis de las salidas de los programas, de manera más particular, fueron las siguientes:

TRNSYS: El programa es muy sensible a la temperatura del cuarto asumida inicialmente. Para los casos de edificios masivos, donde las únicas ganancias son por conducción (sin considerar ventilación), TRNSYS sobreestima las ganancias de calor con respecto a los otros dos programas, tal como se muestra en la figura 2.5.7, donde se observa que en las tres condiciones climáticas analizadas, las salidas de TRNSYS presentan una curva ascendente con mayor pendiente que las de ADMIT o SUNCODE. Aquí se puede mencionar que Judkoff y Neymark corrigieron una falla en los coeficientes de función de transferencia del módulo (BID) de TRNSYS, causando insensibilidad a los efectos de la capacitancia térmica.

En los mismos edificios masivos, al considerar ventilación y ventanas, TRNSYS aparece más sensible a la ventilación que a la radiación solar a través de la ventana. Esto se observa en la figura 2.5.8, ya que en los tres casos de análisis donde se consideraron ventanas, sin ventilación, TRNSYS muestra prácticamente el mismo comportamiento térmico que cuando no se consideraron ventanas, al igual que los otros dos programas, pero en la figura 2.5.9, cuando se incluyeron 5 cambios de aire

por hora con el exterior, TRNSYS manifiesta un comportamiento de la temperatura interior muy dependiente de la temperatura exterior, principalmente en las condiciones más extremas (Leh, en enero), mientras que SUNCODE y ADMIT se comportan más estables.

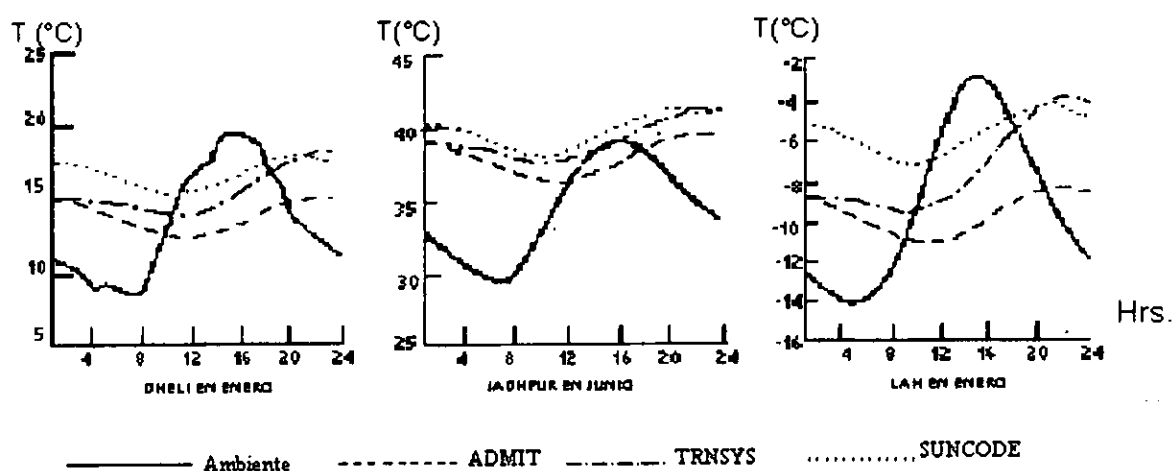


Figura 2.5.7. Edificios masivos, sin ventanas ni ventilación
(fuente: Bansal y Bhandari, 1996)¹².

Para los casos de edificios ligeros, TRNSYS muestra mayor calentamiento que los otros dos modelos sólo cuando no se considera ventilación ni ventanas, lo cual se observa en la figura 2.5.10, al presentar las salidas de TRNSYS una curva ascendente con mayor pendiente que SUNCODE y ADMIT, efecto que se invierte al contemplar ventanas, donde la curva de las salidas de TRNSYS es más estable que las curvas de las salidas de los otros modelos (figura 2.5.11). En este tipo de edificios, cuando se incluye ventilación y se eliminan las ventanas, TRNSYS concuerda en gran medida con los demás programas (fig. 2.5.12).

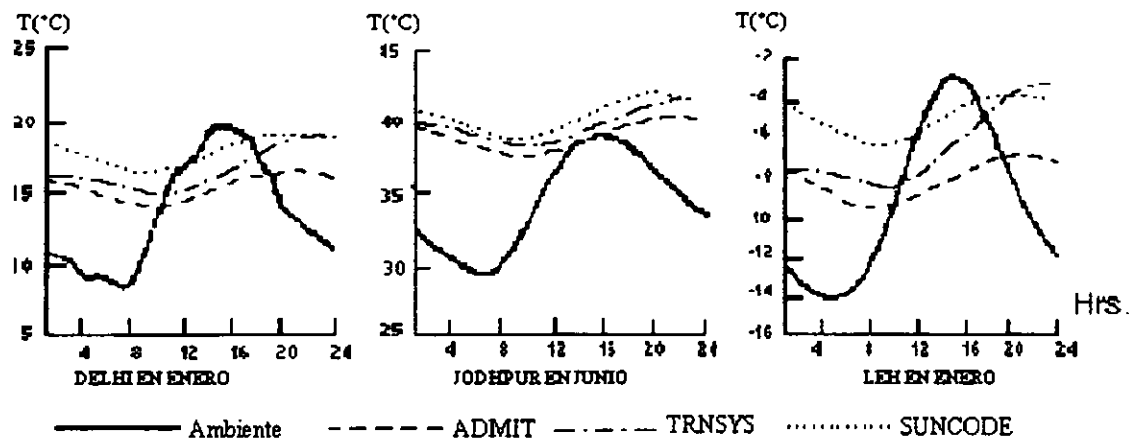


Fig. 2.5.8. Edificios masivos, con ventanas, sin ventilación
(fuente: Bansal y Bhandari, 1996)¹².

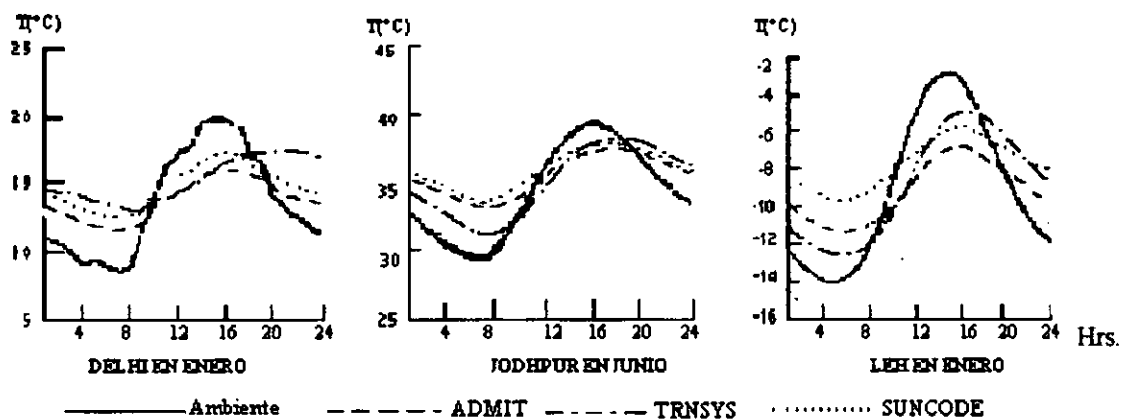


Fig. 2.5.9. Edificios masivos, sin ventanas, con ventilación
(fuente: Bansal y Bhandari, 1996)¹².

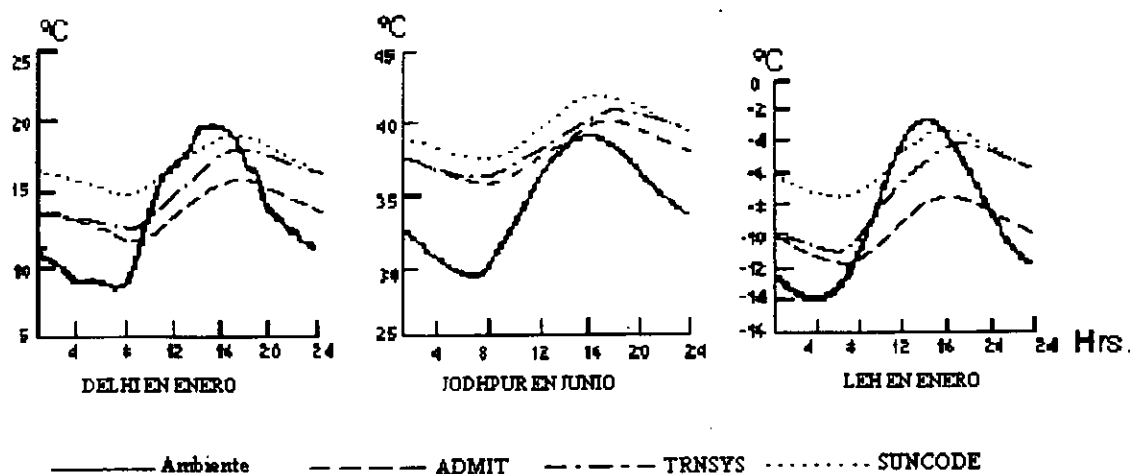


Fig. 2.5.10. Edificios ligeros, sin ventanas ni ventilación
(fuente: Bansal y Bhandari, 1996)¹².

SUNCODE. SUNCODE es la versión comercial para PC del programa SERI-RES, desarrollado por la compañía Ecotope, en Seattle. En todos los casos SUNCODE indicó las temperaturas más altas, aunque muy ligeramente por arriba de ADMIT, excepto cuando la temperatura ambiente era bajo 0°, donde la diferencia, cuando no se consideran ventanas ni ventilación, es alrededor de 4°C, disminuyendo considerablemente cuando se introduce ventilación en el caso de los edificios masivos (figura 2.5.9) y cuando se introduce la ventana para el caso de edificios ligeros (figura 2.5.11).

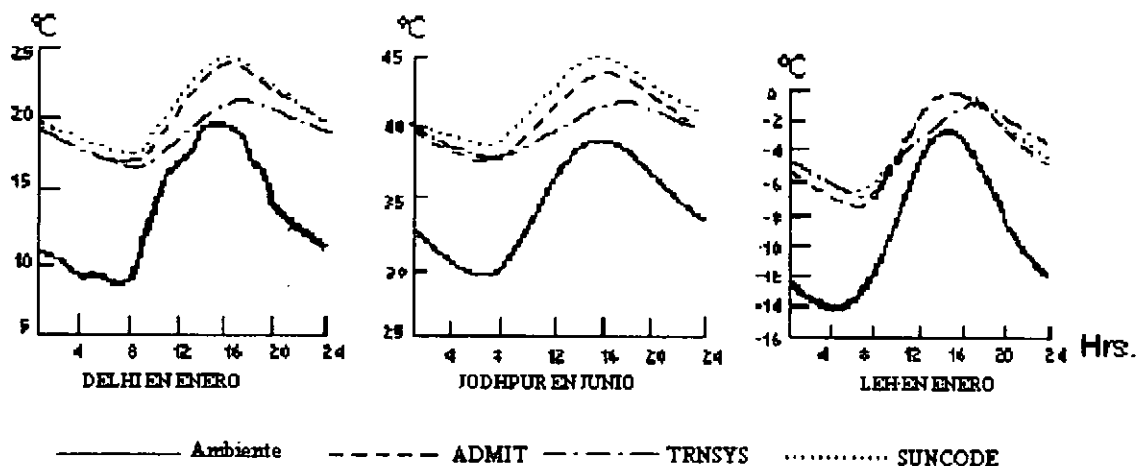


Fig. 2.5.11. Edificios ligeros, con ventanas, sin ventilación
(fuente: Bansal y Bhandari, 1996)¹².

ADMIT. ADMIT ha sido desarrollado con el propósito de incorporar varias técnicas de enfriamiento y/o calentamiento usando la técnica de solución periódica de las ecuaciones que gobierna la conducción de calor, resultando en soluciones de forma cerrada. Los autores tuvieron la flexibilidad de incorporar muchos conceptos pasivos, especialmente para enfriamiento, los cuales aún no son disponibles en la mayoría de los programas.

ADMIT coincidió en la mayoría de las pruebas con SUNCODE, en lo que se refiere al comportamiento térmico, aunque con algunas diferencias en la temperatura, siendo éstas más bajas que las de los otros programas en la mayoría de los casos. Cuando se contemplan temperaturas exteriores abajo de 0°C, ADMIT parece ser más estable térmicamente en los casos masivos que los otros dos programas, excepto cuando se consideran ventanas y ventilación, pero conforme éstas van apareciendo, sus resultados se acercan más a los de TRNSYS y SUNCODE. En los casos de edificios ligeros sólo muestra diferencias cuando no se consideran ventanas ni ventilación, ya que

incluyendo cualquiera de éstas, sus resultados se asemejan a los de los otros programas, tal como se puede ver en la figura 2.5.12.

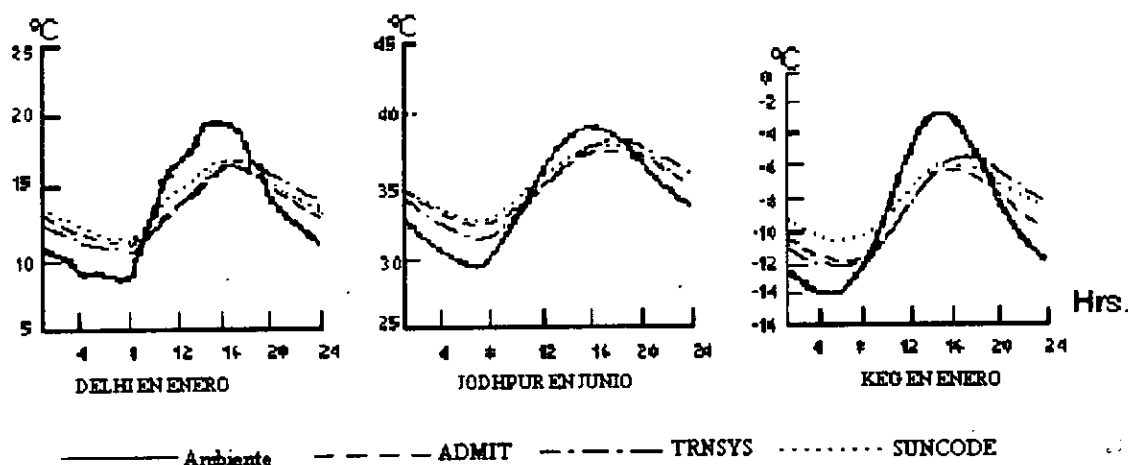


Fig. 2.5.12 Edificios ligeros, sin ventanas, con ventilación
(fuente: Bansal y Bhandari, 1996)¹².

Cabe hacer notar que las simulaciones con los tres programas fueron realizadas para períodos de 24 hrs. solamente, de tal manera que resulta imposible observar claramente los efectos del almacenamiento térmico, la respuesta de los programas ante estos efectos y la "historia" que van generando del comportamiento térmico de los espacios conforme transcurren los días, lo cual ha sido demostrado en otros estudios¹⁶ que puede ser un factor importante de imprecisión.

Por otra parte, se puede resumir que SUNCODE y ADMIT coinciden en muchos resultados y que cuando existe una notable diferencia entre los tres programas, es en el tratamiento de la radiación a través de ventanas, donde TRNSYS muestra considerables diferencias con respecto a las observadas entre SUNCODE y ADMIT.

2.5.2 Validación Empírica.

En el caso de las pruebas de validación empírica, existen estudios realizados con datos registrados en los Estados Unidos principalmente. Las técnicas de monitoreo varían ampliamente para cada estudio, así como las características de los espacios.

Una de estas pruebas de validación es la que en 1995 realizaron **Meldem y Winkelmann**¹⁶, donde se comparan las salidas de **DOE-2** con datos de monitoreos realizados en ocho casas para pruebas en Pala, cerca de San Diego. El estudio estuvo patrocinado por el Laboratorio de Lawrence Berkeley (el mismo que desarrolla DOE-2) y es una parte del proyecto de investigación "Alternatives to Compressor Cooling" desarrollado en el Instituto de California para la Eficiencia Energética.

DOE-2, como se ha mencionado anteriormente, es el programa utilizado para establecer los códigos y estándares nacionales de energía en edificios en los Estados Unidos. En este estudio, para probar la certeza del programa, se compararon las predicciones de DOE-2 con las mediciones de cuatro de las casas no acondicionadas que fueron monitoreadas en 1993 y 1994.

Las características de cada una de las casas monitoreadas son diferentes (fig. 2.5.13), pudiendo de esta manera evaluarse varios parámetros del programa. En la figura 2.5.14 se muestra la distribución de las casas y los puntos donde se ubicaron los sensores. Para cada configuración se contemplaron dos tipos de construcción, una de alta masividad (de bloques de concreto de 4" y con aislamiento exterior) y una de baja masividad (construida con muros de estuco).

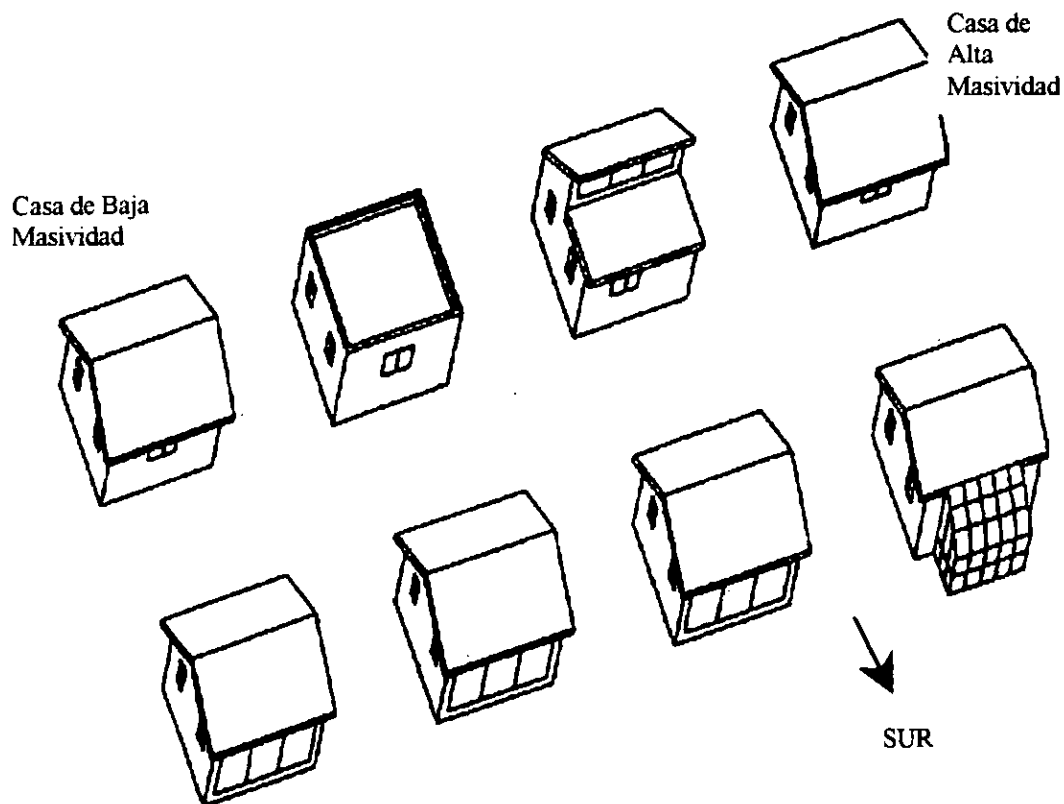


Figura 2.5.13 Configuración de las casas de prueba de Pala.
(fuente: Meldem, R. y Winkelmann, F. 1995)¹⁶.

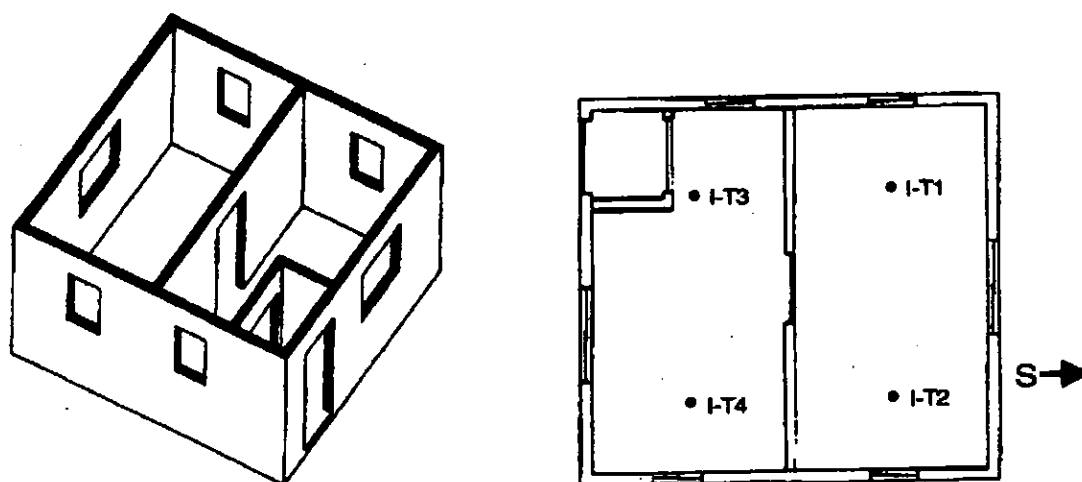


Figura 2.5.14 Perspectiva de las casas y planta donde se muestra la ubicación de los sensores interiores (I-T1, I-T2, I-T3 e I-T4) para medir la temperatura. La puerta entre los cuartos se encontraba abierta durante las mediciones. *(fuente: Meldem, R. y Winkelmann, F. 1995)¹⁶.*

Los datos que se compararon con DOE-2 corresponden al promedio de las dos mediciones realizadas en la habitación orientada al norte, debido a que DOE-2 asume que el aire en cada cuarto está totalmente mezclado y presenta la misma temperatura.

Una observación importante de esta investigación, es que las salidas iniciales de DOE-2 eran ampliamente diferentes con respecto a los datos monitoreados en las casas de alta masividad y que esta diferencia iba disminuyendo conforme avanzaba la simulación (figura 2.5.15). Este fenómeno no sucedía para las casas de baja masividad. El efecto de “acoplamiento” entre las simulaciones y los monitoreos fue tratado como un período al que llamaron “warm-up” (calentamiento) en DOE-2, que consiste en siete días en los cuales la simulación se repite una y otra vez con el mismo archivo de clima para permitir que el edificio se “estabilice”, aunque se observó que un período de 11 días es más apropiado. En el estudio se presentan únicamente los resultados después de 11 días de simulación.

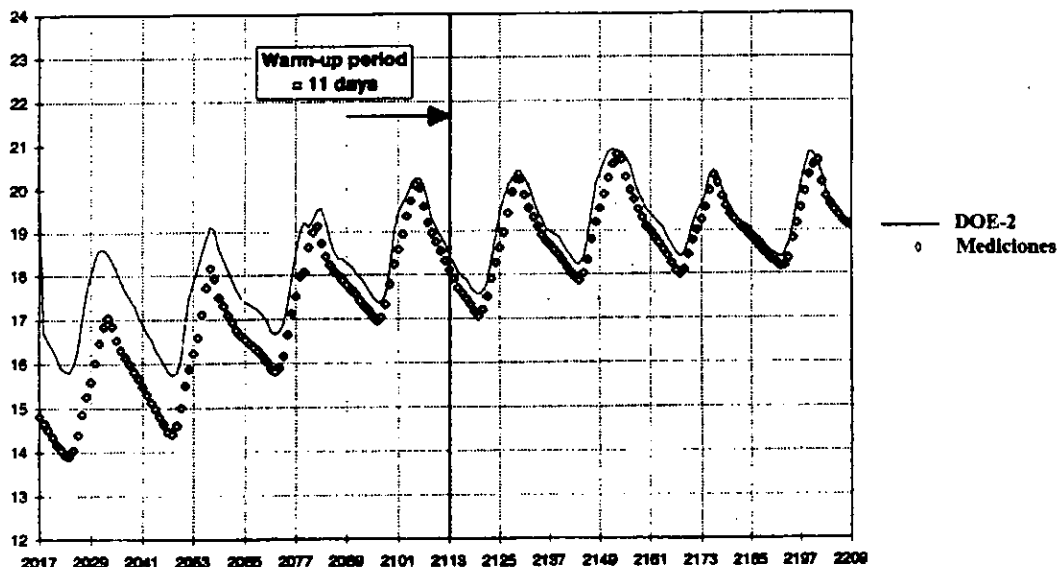


Figura 2.5.15 Efecto del período de calentamiento o “warm-up period” en DOE-2 en las casas de alta masividad con ventanas sombreadas (fuente: Meldem, R. y Winkelmann, F. 1995) ¹⁶.

La tabla 2.5.1 muestra en resumen las 4 configuraciones que se contemplaron, tanto para las casas de alta masividad, como para las de baja masividad, así como la diferencia principal entre las predicciones de DOE-2 y los datos monitoreados.

CONFIGURACIÓN	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL	FIGURA No.	VARIACIÓN PRINCIPAL (°C)	
			ALTA MASIVIDAD	BAJA MASIVIDAD
1. Color original, ventanas sin sombras, sin ventilación	Básica	2.5.16	0.5	0.4
2. Color original, ventanas sombreadas, sin ventilación	Ventanas	2.5.17	0.4	0.2
3. Superficies exteriores blancas, ventanas sombreadas, sin ventilación	Techos y muros blancos	2.5.18	1.1	0.4
4. Superficies exteriores blancas, ventanas sombreadas, ventilación nocturna	Ventilación nocturna	2.5.19	0.9	0.6

Tabla 2.5.1. Resumen de las configuraciones para las comparaciones de DOE-2 con el monitoreo. (fuente: Meldem, R. y Winkelmann, F. 1995)¹⁶.

En la figura 2.5.16 se presenta la configuración básica: ventanas sin sombrear, muros y techo de color original. No existía ventilación debido a que tanto las puertas como las ventanas se encontraban cerradas todo el tiempo. En esta prueba se analizó principalmente la facultad de DOE-2 para calcular la radiación incidente sobre las ventanas, la transmisión a través de los vidrios, la absorción de la radiación por las superficies interiores, el calor asociado a esas superficies y el resultado de la transferencia del calor convectivo de las superficies al aire del espacio. Como se puede ver en las gráficas, tanto para la casa de alta masividad como para la de baja masividad, DOE-2 concuerda significativamente.

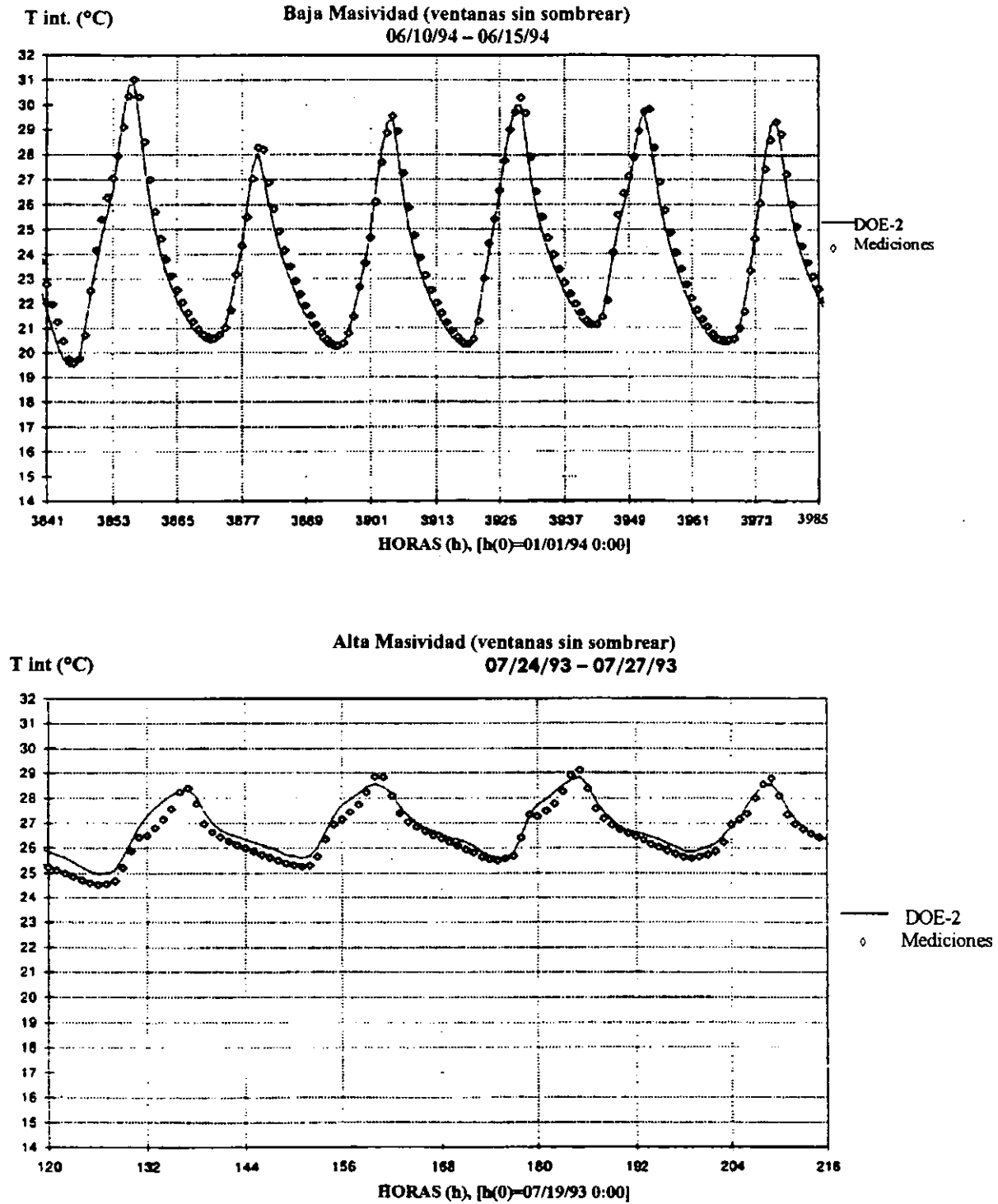


Figura 2.5.16. DOE-2 vs. monitoreo. Configuración básica: color exterior original, ventanas sin sombrear y sin ventilación (fuente: Meldem, R. y Winkelmann, F. 1995) ¹⁶.

Cuando se sombrearon las ventanas (figura 2.5.17), la ganancia solar global de redujo aproximadamente en un 80% y se puede ver que DOE-2 también simula adecuadamente esta característica.

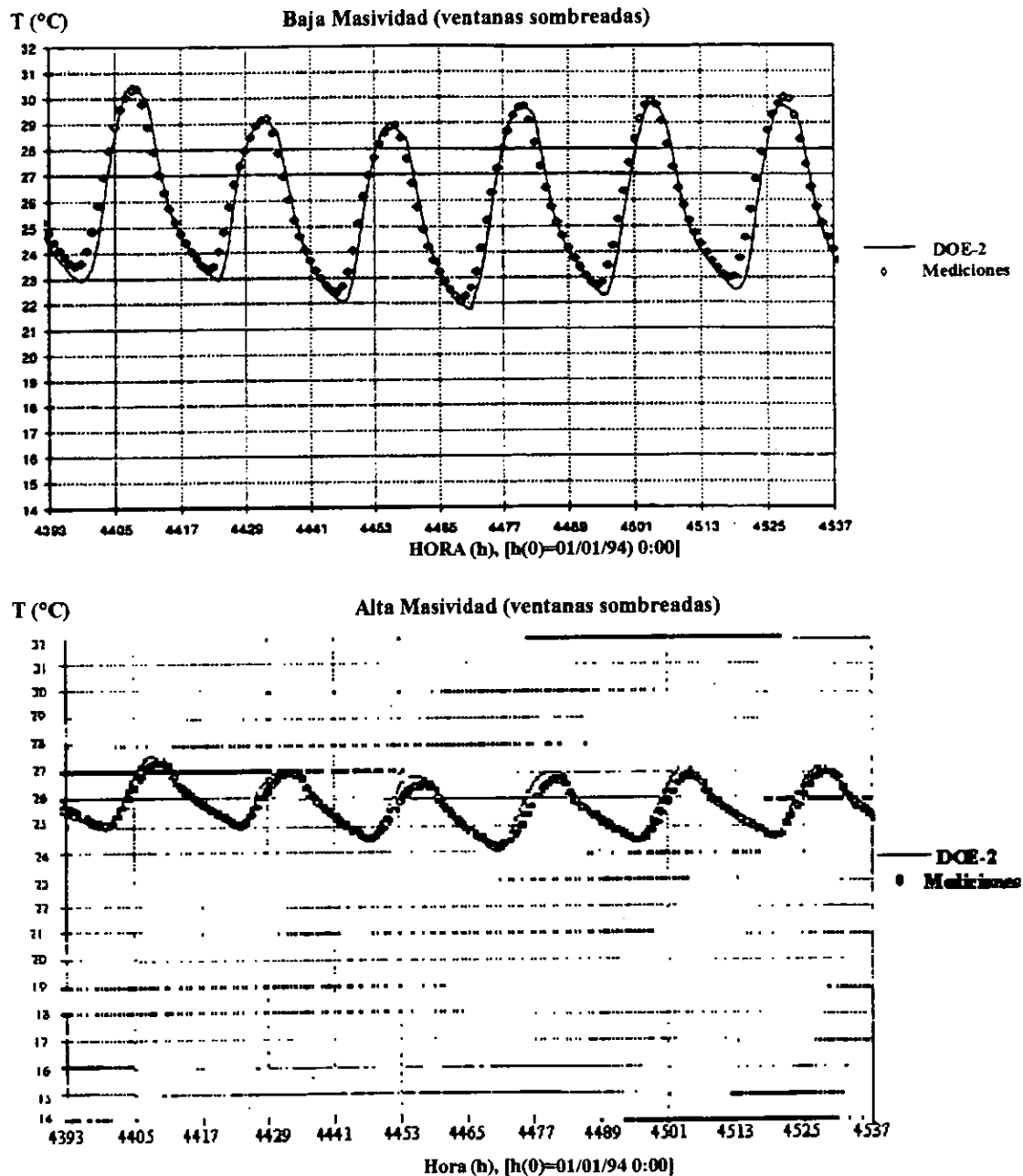


Figura 2.5.17. DOE-2 vs. monitoreo. Configuración 2: color exterior original, ventanas sombreadas y sin ventilación (fuente: Meldem, R. and Winkelmann, F. 1995) ¹⁶.

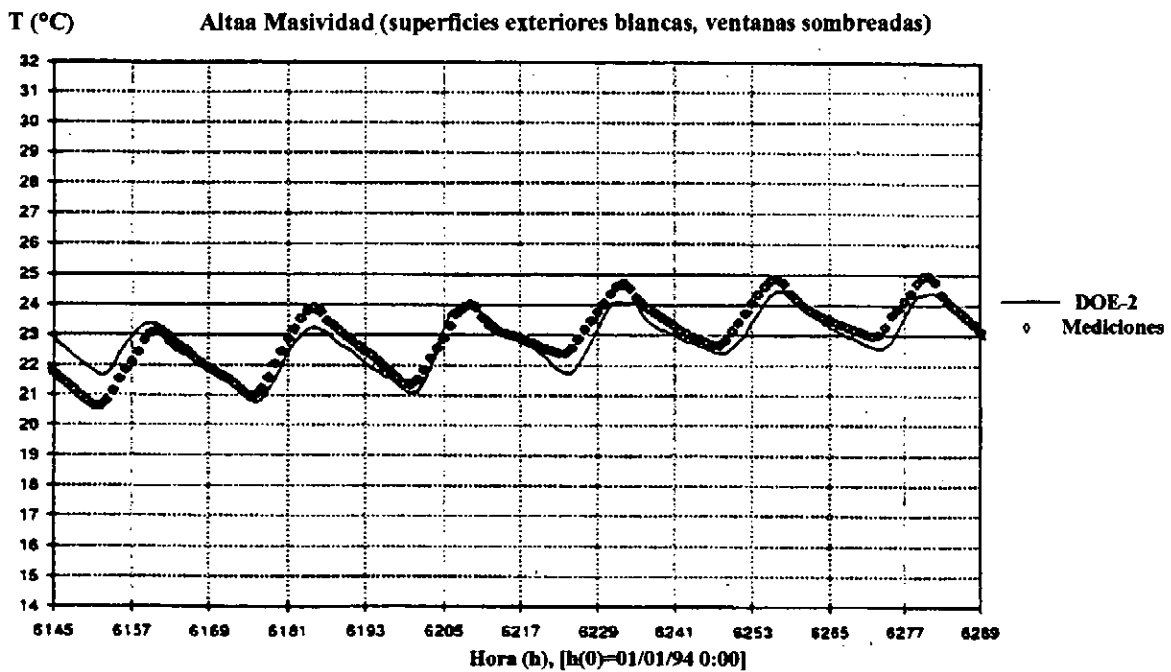
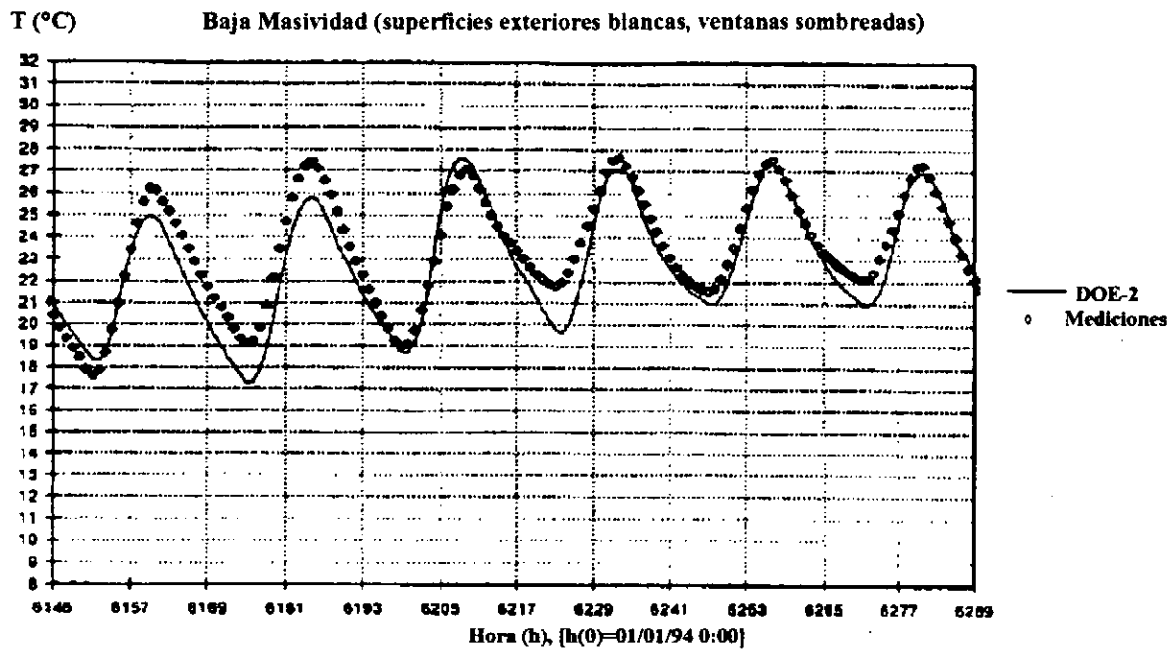


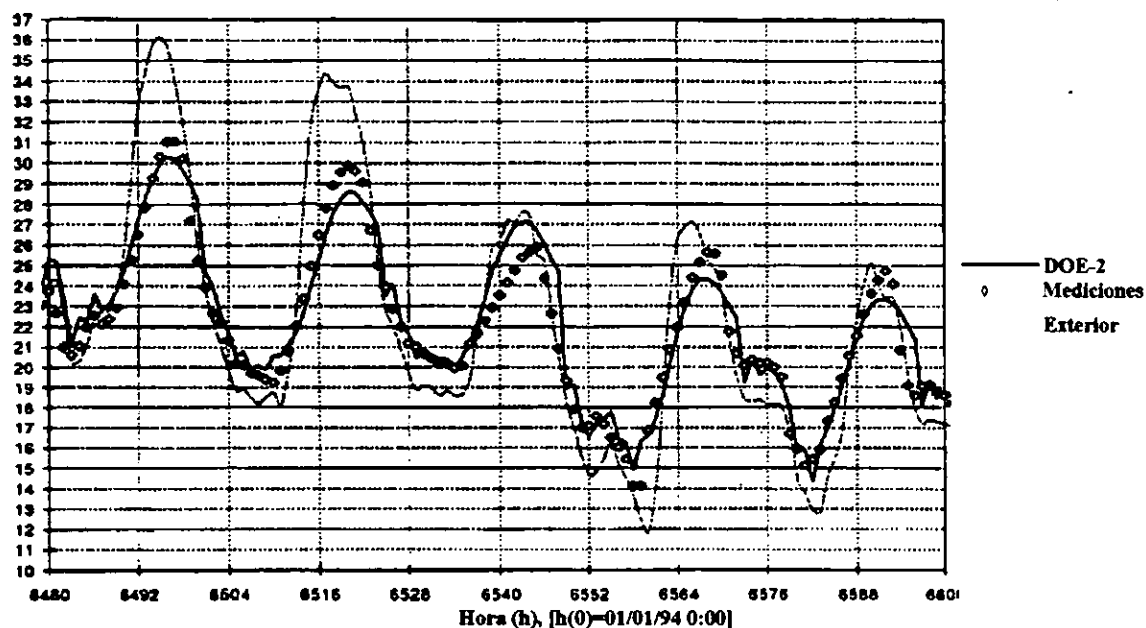
Figura 2.5.18. DOE-2 vs. monitoreo. Configuración 3: color exterior blanco, ventanas sombreadas y sin ventilación (fuente: Melder, R. and Winkelmann, F. 1995) ¹⁶.

Al considerar las casas con las superficies exteriores en color blanco (figura 2.5.18), la absorptancia del techo se redujo de 0.88 a 0.40, y la de los muros de 0.60 a 0.36. En esta prueba se pudo analizar la facultad de DOE-2 para calcular la radiación solar absorbida por los muros y el techo y la fracción de radiación absorbida que es conducida al interior de los cuartos, ya sea directamente a través de los muros exteriores o indirectamente a través del ático. Las gráficas muestran nuevamente la amplia concordancia de DOE-2 con las mediciones.

Al último caso (figura 2.5.19) se le denominó Ventilación Nocturna. En esta casa los cuartos se ventilaron con treinta cambios de aire por hora de 7.00 p.m. a 7.00 a.m. con un ventilador colocado en una ventana del cuarto sur, que impulsaba al aire a través del vano de la puerta hacia el cuarto del norte. Durante el día el ventilador se mantenía apagado y las ventanas cerradas. El flujo del aire fue determinado midiendo la velocidad del aire a través del área del ventilador. En esta prueba se demostró que DOE-2 simula adecuadamente el enfriamiento por convección forzada.

En general, y como puede apreciarse en las gráficas, en esta investigación se concluyó que DOE-2 concuerda excelentemente con las medidas de todas las configuraciones, tanto para las casas de alta masividad, como para las de baja masividad.

T (°C) Baja Masividad (superficies exteriores blancas, ventilación nocturna, ventanas sombreadas)



T (°C) Alta Masividad (superficies exteriores blancas, ventilación nocturna, ventanas sombreadas)

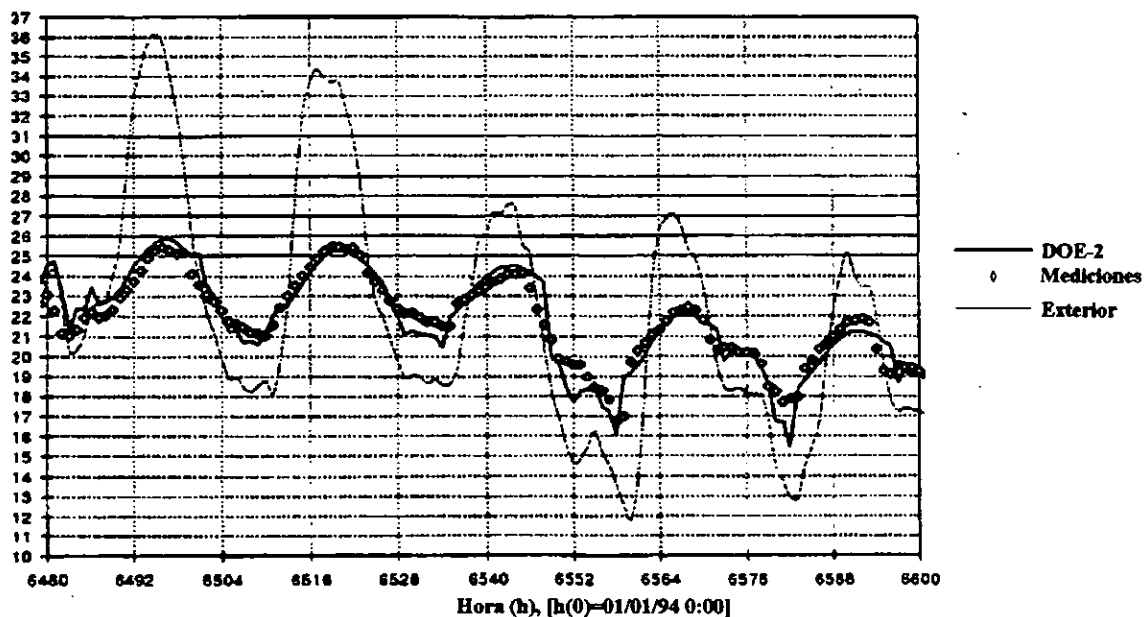


Figura 2.5.19. DOE-2 vs. monitoreo. Configuración 4: color exterior blanco, ventanas sombreadas y ventilación nocturna (fuente: Meldem, R. y Winkelmann, F. 1995)¹⁶.

Otra Validación Empírica es la realizada por Eppel¹³, en la cual hace una comparación de las salidas de los programas ESP, HTB2 y SUNCODE, con datos de los edificios de prueba de energía solar pasiva del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de Estados Unidos. Estos programas fueron escogidos por ser los tres ampliamente usados en el Reino Unido para la investigación y en el diseño de edificios solares pasivos.

Para este análisis el autor contó con los datos registrados por 457 sensores colocados dentro y fuera de un edificio ubicado en Gaithersburg, Maryland, en Estados Unidos, compuesto por cuatro celdas fuertemente aisladas una de otra. De este modo el margen de error en los monitoreos fue prácticamente nulo. Los principales parámetros analizados en este caso fueron la temperatura interior y la carga de calentamiento. El espacio estaba acondicionado para que la temperatura mínima fuera de 20°C, por debajo de los cuales comenzaba la operación del aire acondicionado. Bajo estas circunstancias, el análisis de los paquetes se pudo hacer exhaustivamente dando como resultado un amplio panorama de sus características, que de manera resumida se pueden mencionar a continuación.

ESP-r. La versión utilizada para este estudio fue ESP-r Series 8, y se detectó una falla importante. La versión 8.4c, del módulo del programa principal *bps*, mostró una diferencia de más del 50% abajo de los valores originalmente estimados para la energía de calentamiento, como se puede apreciar en la figura 2.5.22. Se estableció que ésta versión, recientemente incluida en el programa, era menos buena que la versión 8.1a. La falla únicamente afectaba a los sistemas de calentamiento y ya ha sido corregida en la versión 8.6a. En lo referente a las comparaciones con los otros programas y a las mediciones, en el cálculo de la energía total de calentamiento, ESP-r indicó demandas de

energía marcadamente por debajo de las mediciones, siendo el programa con mayores diferencias, y con respecto al cálculo de temperaturas, también estuvo por abajo de las mediciones, aunque muy ligeramente.

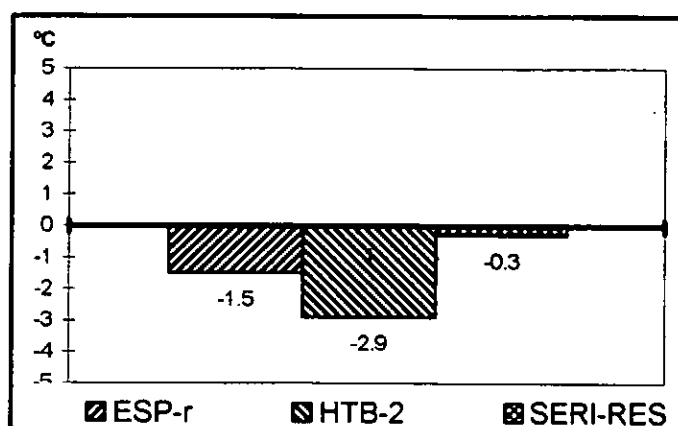


Figura 2.5.20. Principal diferencia entre la Temperatura Máxima medida y la estimada por los modelos. (fuente: Eppel, Herbert. 1995) ¹³.

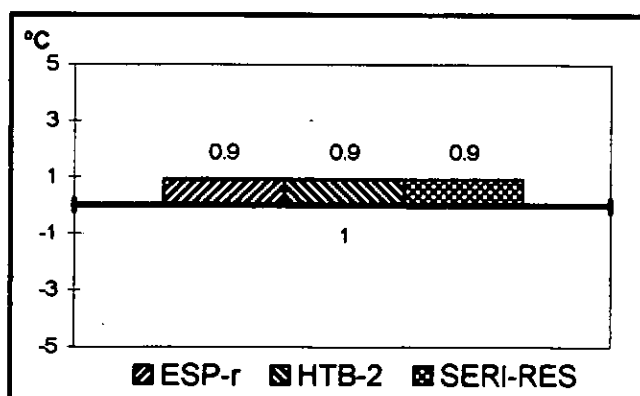


Figura 2.5.21. Principal diferencia entre la Temperatura Mínima medida y la estimada por los modelos. (fuente: Eppel, Herbert. 1995) ¹³.

HTB2. HTB2 (Heat Transfer in Buildings) fue desarrollado en la Universidad de Wales College de Cardiff. La versión utilizada fue la 1.10. Este programa marcó ligeramente mayor la demanda total de energía para calentamiento (fig. 2.5.22) y las predicciones de temperatura estuvieron por abajo de las temperaturas medidas.

SERI-RES. SERI-RES (Solar Energy Research Institute Residential Energy Simulator) fue originalmente desarrollado por la compañía Ecotope en asociación con el Instituto de Investigación en Energía Solar de Estados Unidos (hoy el Laboratorio de Energía Renovable Nacional) y posteriormente desarrollado por la compañía Ecotope establecida en Seattle, que lo comercializó como una versión para PC llamada SUNCODE. La versión utilizada para esta versión es la 1.2. Este programa predijo ligeramente por abajo la demanda de energía para calentamiento (fig. 2.5.22), pero en las predicciones de temperatura concordó en gran medida con las mediciones (figs. 2.5.20 y 2.5.21).

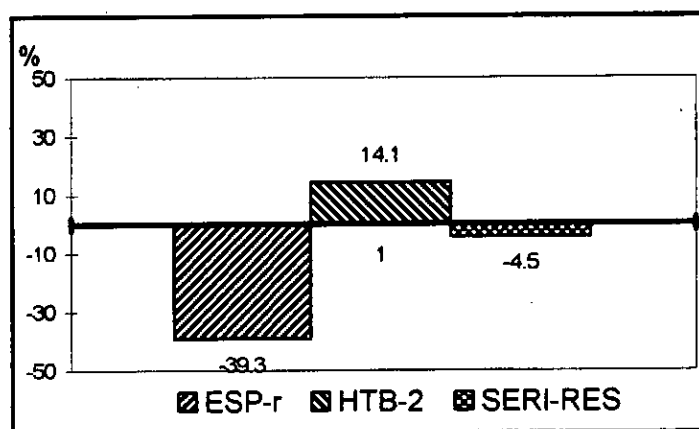


Figura 2.5.22. Principal diferencia entre la demanda total de Energía de Calentamiento real y la estimada por los modelos. (fuente: Eppel, Herbert. 1995) ¹³.

En el caso de la República Mexicana, se identificó solamente un estudio empírico, ya que son pocas las investigaciones que se han llevado a cabo para dar validez a los programas de diseño térmico, puesto que estos han sido usados principalmente en la investigación de distintos fenómenos térmicos, confiando en la precisión de sus resultados y no se ha profundizado en el análisis de su estructura y/o filosofía.

El estudio mencionado fue presentado por **Fernández A.** en su tesis titulada **Climatización Natural de una Vivienda en San Pedro Mártir, Tlalpan, D.F.**¹⁷, en la que se comparan los resultados de las corridas de TRNSYS, en sus modalidades de balance simplificado (TYPE 12) y balance detallado (TYPE 56), con los resultados del cálculo basado en la metodología propuesta por el ASHRAE¹⁸ (1989) modificada para México por Sámano, Vázquez y Morales¹⁹.

En este caso, el espacio monitoreado fue una casa habitación, la cual se encontraba en uso durante el período del monitoreo. Si bien esta circunstancia es un factor de alta imprecisión debido a la gran cantidad de variables que no se pueden controlar, los resultados que se obtienen representan lo que en realidad sucede dentro de un espacio de esta índole.

Para realizar el análisis se monitorearon durante siete días tres espacios diferentes de la vivienda: la habitación principal, el cubo de escaleras y el estudio. La primera orientada al este, y las dos últimas al oeste.

En las gráficas que aquí se presentan únicamente se muestran los resultados de las corridas de TRNSYS, ya que fue el único modelo de simulación térmica que se utilizó (el método basado en la metodología del ASHRAE no es un modelo de simulación, sino una metodología para realizar balances térmicos en estado permanente).

En esta investigación, la versión utilizada de TRNSYS fue la 13.1. Para poder entender un poco los resultados que arrojan cada una de las modalidades de TRNSYS, aquí se describen, de manera general, cada una de ellas.

TYPE 12. El TYPE 12 es la metodología más sencilla de TRNSYS para realizar balances térmicos en edificios; consiste en el cálculo hora por hora de las ganancias de calor de una edificación, utilizando el valor del Coeficiente Global de Transferencia de Calor de la envolvente (UA) y el de la Capacitancia Térmica de la edificación (CAPAC).

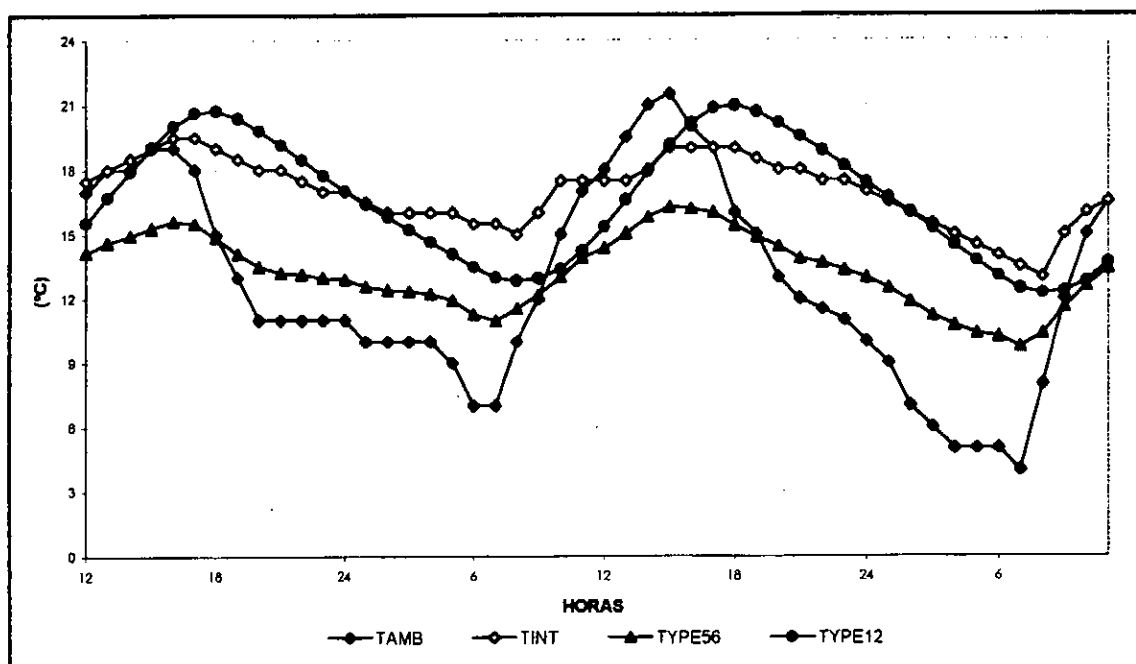


Fig. 2.5.23. Comparación de resultados entre los diferentes modelos de simulación térmica y las condiciones reales (Escalera). (Fuente: Fernández, A. y Morales, J.D., 1996) ¹⁷.

Como resultado del análisis de las gráficas, se determinó que esta metodología tiene una mejor precisión a nivel de medias que la modalidad detallada (ver fig. 2.5.23), aunque en días atípicos su efectividad puede disminuir notablemente.

TYPE 56. Esta modalidad es la más detallada con la que cuenta TRNSYS, en ella se consideran todas las componentes de la edificación, así como las dimensiones y propiedades termofísicas de los

materiales y su posición dentro de la edificación, requiriendo por lo mismo, una descripción más detallada y en consecuencia, el margen de errores en las entradas puede ser mayor.

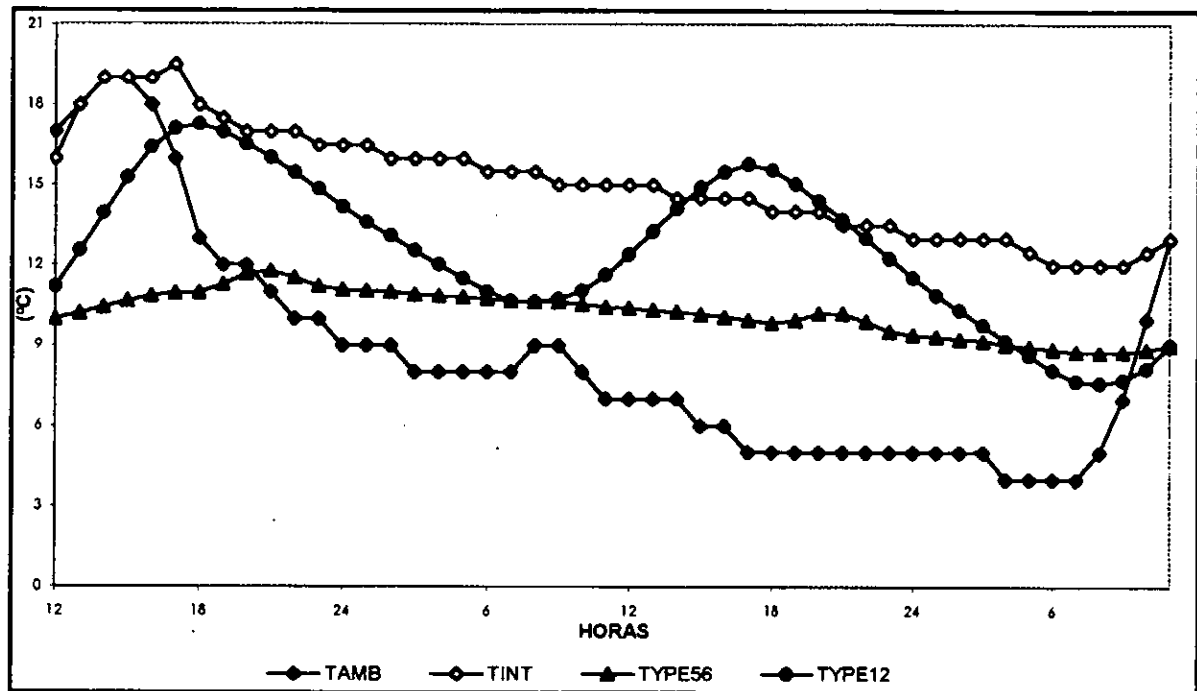


Fig. 2.5.24 Comparación de resultados entre los diferentes modelos de simulación térmica y las condiciones reales (Estudio). (Fuente: Fernández, A. y Morales, J.D., 1996)¹⁷.

Los resultados presentados por esta metodología, aparentemente difieren mucho más de los resultados monitoreados que las otras metodologías, principalmente en la gráfica 3.5.23, donde la diferencia con los datos monitoreados llega hasta los 7°C, sin embargo, hay que reconocer que a nivel general, este "type" representa de manera más real el comportamiento térmico de la edificación que las otras metodologías, excepto en el caso de la recámara principal, donde el TYPE 12 es más certero. Aquí hay que recalcar que durante el periodo de monitoreo de la recámara principal, se registraron los días con mayor oscilación diaria en la temperatura exterior (más de 20°C), lo cual no sucede en los otros dos monitoreos (donde el TYPE 56 es más exacto).

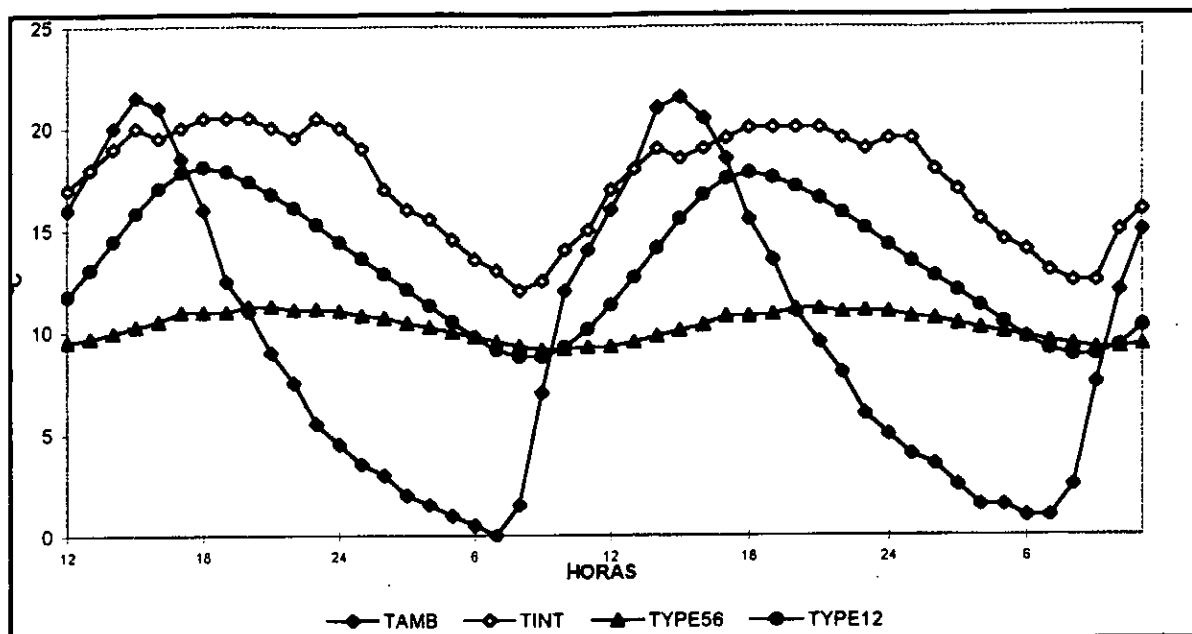


Figura 2.5.25 Comparación de resultados entre los diferentes modelos de simulación térmica y las condiciones reales (Recámara Principal). (Fuente: Fernández, A. y Morales, J.D., 1996)¹⁷.

De este estudio, se puede concluir que el TYPE 56 estima aceptablemente las variaciones horarias de la temperatura bajo condiciones ambientales estables, pero cuando la temperatura exterior tiene oscilaciones fuertes (climas extremos), el modelo más apropiado es el TYPE 12. No obstante, la precisión de ambos "types" tiene desacuerdos significativos en comparación con las mediciones. Al respecto, el autor menciona la gran cantidad de variables que se manejan en este tipo de simulaciones así como el hecho de haber realizado el monitoreo con la presencia de usuarios, por lo que sus resultados deben ser tomados en cuenta con ciertas reservas.

Después de haber revisado y analizado los diferentes estudios presentados en este capítulo, se decidió realizar el presente trabajo con los programas TRNSYS y DOE-2, ya que se observó que los dos modelos se cuentan entre los más utilizados a nivel mundial, que son bastante precisos y además era posible tener acceso a ambos simuladores. El análisis realizado con estos programas se presenta a partir del siguiente capítulo.

Capítulo 3

ESTUDIO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN TÉRMICA: TRNSYS 13.1 Y DOE-2.1E.

Hasta la fecha han sido pocos los programas de diseño térmico que se han logrado conocer en la República Mexicana, así como el número de personas que actualmente se han familiarizado con su uso y aplicación en diversos proyectos, sin embargo, dentro de este reducido grupo, son dos los programas que destacan y que aparentemente han logrado proporcionar buenos resultados: DOE-2 y TRNSYS. Otro aspecto relevante de estos dos programas es su importancia dentro del ámbito internacional, pues como se observó en el capítulo anterior, tanto DOE-2 como TRNSYS fueron evaluados con resultados favorables dentro de un grupo de programas de simulación térmica de los más avanzados.

Por estas razones, DOE-2.1E y TRNSYS 13.1 han sido los dos modelos que se han seleccionado para el presente estudio, siendo de esperarse que su aplicación en México también sea satisfactoria. No obstante, debido a las características y suposiciones que hacen cada uno de los programas (metodologías de cálculo, diagramas de flujo, bases de datos, etc.), la precisión de los resultados, al compararlos con resultados experimentales en la República Mexicana, puede variar significativamente.

Las metodologías que se usan para realizar las simulaciones varían en cada programa y, afortunadamente, en ambos casos es posible tener acceso a su descripción, pudiendo de esta manera, conocer las ecuaciones y algoritmos que utilizan cada una de ellas, así como la filosofía de

los programas. Por otra parte, también es posible acceder al código fuente, el cual puede ser modificado por el usuario de acuerdo a su conveniencia, en el caso de que la disposición original de los programas no se adapte totalmente a sus necesidades.

Es conveniente hacer una observación de los objetivos principales de cada programa, que es la principal diferencia entre ellos: TRNSYS es un programa diseñado para realizar simulaciones de sistemas solares activos (ya sean colectores solares, sistemas fotovoltaicos, muros de almacenamiento térmico, etc.) y dentro de sus capacidades está la simulación térmica de edificios; DOE-2, por su parte, está diseñado expresamente para la simulación del uso de la energía en los edificios, principalmente en el aspecto térmico y por lo tanto, es comprensible que en ocasiones profundice más en algunos detalles de este tipo que TRNSYS. Esto no quiere decir que las predicciones de DOE-2 sean mejores que las de TRNSYS, sino que en algunos casos puede haber características que serán descritas más fácilmente en DOE-2 que en TRNSYS o que la información requerida de un edificio será más específica en un programa que en otro. La exactitud de las predicciones de cada programa dependerá de varios aspectos que se irán observando más adelante.

En los siguientes capítulos se tratará de describir más detalladamente las características y diferencias entre estos programas.

3.1 Características Generales de los Modelos

3.1.1 TRNSYS

TRNSYS (A Transient System Simulation Program) es desarrollado por la Universidad de Wisconsin-Madison, en Madison, EUA. Está diseñado para realizar cálculos de transferencia de calor en estado transitorio y ha sido considerado como el programa más avanzado para la simulación de sistemas solares activos patrocinado por el Departamento de Energía de los E.U. (DOE)¹. El programa ha estado en constante actualización desde su creación y ha estado disponible al público desde la versión 6.0, que data de 1975. La versión utilizada para el presente estudio es la 13.1, cuya última revisión fue realizada en abril de 1992. Aunque a la fecha existen dos versiones posteriores (14.1 y 14.2), se ha utilizado la 13.1 por ser esta la versión a la cual se tuvo acceso al momento de realizar la presente investigación.

TRNSYS 13.1 tiene una estructura modular compuesta por más de 80 subrutinas que deben ser enlazadas para poder llevar a cabo una simulación. Esta característica le permite hacer simulaciones del comportamiento térmico de un gran número de proyectos de distinta naturaleza, como colectores solares, muros de almacenamiento térmico, sistemas fotovoltaicos, edificios residenciales y no residenciales, etc., en los que se considera el paso del tiempo durante el período en que se lleva a cabo la simulación. También es posible realizar simulaciones de los requerimientos de energía de equipos de calefacción y aire acondicionado e incluso realizar una estimación económica del consumo de energía del proyecto.

El paquete está complementado con el subprograma TRANSED²⁰, que es un editor diseñado para hacer más sencillo el uso del TRNSYS y consiste en una interfase en la cual las entradas de TRNSYS pueden ser visualizadas en una serie de ventanas, donde se puede revisar y/o cambiar la información, pudiendo de esta manera realizar simulaciones posteriores sin necesidad de elaborar nuevamente todo el archivo de descripción. Además, en esta interfase se proporciona ayuda detallada, conversión de unidades y comprobación de la información introducida.

En lo referente a la simulación de edificios, TRNSYS 13.1 tiene tres modalidades de operación: el TYPE 12, donde se realiza una simulación global, el TYPE 19, que consiste en una simulación detallada de una zona, y el TYPE 56, que es la modalidad más detallada y puede simular varias zonas a la vez. El TYPE 56 requiere de un programa de descripción del edificio llamado BID (Building Input Description), que genera los archivos utilizables por el TYPE 56 para llevar a cabo una simulación. Las metodologías empleadas por cada uno de estos modelos se discute más adelante.

3.1.2 DOE- 2

DOE-2 ha sido desarrollado por el Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley (LBNL) y ha sido patrocinado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos desde 1980. Actualmente es la base técnica para determinar los estándares y parámetros energéticos nacionales en los edificios de los Estados Unidos. Desde su creación, DOE-2 ha estado en constante actualización, de tal manera que aproximadamente cada dos o tres años se pone a disposición del público una nueva versión.,

tanto para computadoras main-frame como para PCs. Para este estudio se ha empleado la versión 2.1E (realizada en 1994), así como documentación de las versiones anteriores.

DOE-2.1E está diseñado para predecir el consumo horario de energía, así como su costo en un edificio, introduciendo información horaria del clima y una descripción detallada del edificio, de los sistemas de acondicionamiento del espacio y de su operación.

DOE-2.1E se compone de dos partes principalmente: La primera es el Lenguaje de Descripción del Edificio (Building Description Language -BDL-), programa que acepta los datos proporcionados por el usuario. La segunda parte se compone de 4 subprogramas de simulación que reciben el nombre de LOADS, SYSTEMS, PLANTS Y ECONOMICS, en los que se calculan las pérdidas o ganancias de calor del edificio, la distribución de la energía que será extraída o adicionada por los sistemas de aire acondicionado, los requerimientos de combustible o energéticos de los equipos de acondicionamiento y el costo de combustible y electricidad, respectivamente. En el presente estudio sólo se analizará el módulo de LOADS (cargas), por ser en él donde se lleva a cabo la evaluación térmica de los edificios.

3.2 Arquitectura de los Modelos

TRNSYS 13.1, como se ha mencionado, es un programa modular, lo que le da una enorme flexibilidad para la simulación de diversos sistemas termodinámicos. Esta característica le permite también, agregar modelos matemáticos no incluidos en las librerías estándar del programa,

incrementando así su capacidad de simulación. Las subrutinas incluidas en TRNSYS 13.1, de acuerdo a su función, se dividen en cuatro diferentes grupos:

- a) Rutinas de Núcleo,
- b) Rutinas de Soporte,
- c) Rutinas de Componentes y
- d) Rutinas de Utilidad.

Las dos primeras rutinas (núcleo y de soporte) se utilizan para conformar los archivos ejecutables para las simulaciones de diversos sistemas. Una vez creados estos archivos, ya se puede llevar a cabo una simulación.

Las rutinas de utilidad son cuatro sub-programas que procesan información para generar archivos requeridos por determinadas subrutinas, es decir, que algunas subrutinas que conforman un sistema específico, requieren datos que no pueden ser introducidos directamente por el usuario y por lo tanto, necesitan ser procesados para generar archivos con características utilizables por el programa.

Las rutinas de componentes son aquellas que conforman la descripción de un sistema determinado y deben entrelazarse entre sí, por medio de sus salidas y/o entradas, para poder simular dicho sistema.

Estas rutinas, a su vez, se clasifican en las siguientes categorías:

- Subrutinas de Utilidad
- Colectores Solares
- Almacenamiento Térmico

- Controladores
- Hidráulicos
- Auxiliares de Calentamiento y Enfriamiento
- Intercambiadores de Calor
- Estructuras y Cargas de Edificios
- Subsistemas Combinados
- Salidas

Aunque en la simulación térmica de edificios se pueden incluir varias de estas subrutinas, las que se emplean principalmente son las subrutinas de Utilidad, las de Estructuras y Cargas de Edificios y las de Salidas, cuyas componentes se enumeran a continuación:

Subrutinas de Utilidad:

- TYPE 9: Lector de Datos
- TYPE 14: Funciones Dependientes de Tiempo
- TYPE 15: Operaciones Algebraicas
- TYPE 16: Procesador de Radiación
- TYPE 24: Integrador de Cantidades
- TYPE 30: Sombreado de Protección de Colectores
- TYPE 33: Psicrométricos
- TYPE 41: Secuenciador del Perfil de Cargas
- TYPE 44: Promotor de Convergencia
- TYPE 54: Generador de Clima

Estructuras y Cargas de Edificios:

- TYPE 12: Cargas de Enfriamiento o Calentamiento del Espacio. Energía/(Día Grado)
- TYPE 18: Áticos y Techos Inclinados
- TYPE 19: Zona Detallada (Funciones de Transferencia)
- TYPE 34: Sombreado de Aleros y Parteluces
- TYPE 35: Ventanas con Aislamiento Variable
- TYPE 36: Muro de Almacenamiento Térmico
- TYPE 37: Invernadero Adosado
- TYPE 56: Edificio Multizonal y BID

Salidas:

- TYPE 25: Impresora
- TYPE 26: Graficador
- TYPE 27: Graficador de Histogramas
- TYPE 28: Resumen de la Simulación
- TYPE 29: Análisis Económico

Como puede observarse, la cantidad de subrutinas que se pueden incluir en TRNSYS 13.1, para la simulación de un edificio, hacen necesario que el usuario tenga bien claro cuáles son las componentes de su edificio y su interacción dentro del mismo, volviendo un poco más complicado su empleo y demandando cierta experiencia en la elaboración de los archivos para poder obtener buenos resultados.

Un recurso de apoyo para poder estructurar las componentes de una simulación es la elaboración de un diagrama de flujo del sistema (en este caso, del edificio), como se muestra en la figura 3.3.1 que se describe más adelante.

DOE-2.1E es mucho más sencillo que **TRNSYS 13.1** en este sentido, ya que, por ser su objetivo principal el análisis energético detallado de muchos tipos de edificios y espacios acondicionados, el usuario no tiene que determinar cuáles son las partes del sistema, sino sólo describirlas de acuerdo al orden lógico del programa.

DOE-2.1E, como ya se mencionó, se compone de dos partes principalmente: a) un procesador de entradas llamado **Building Description Language (BDL)**, donde el usuario hace la descripción del edificio, y b) 4 subprogramas de simulación denominados **LOADS, SYSTEMS, PLANTS Y ECONOMICS** que utilizan los datos de entrada (**BDL**) más la información horaria del clima para calcular las características horarias de la energía en el edificio. Cada uno de estos subprogramas realizan las siguientes funciones:

LOADS. Es el cálculo de las pérdidas y ganancias de calor de los espacios del edificio y las cargas de enfriamiento y calentamiento impuestas por los sistemas de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (**HVAC**) en el edificio. Este cálculo se lleva a cabo para una temperatura del espacio en un determinado tiempo y es comúnmente llamada el cálculo de **CARGAS (LOADS)**.

SYSTEMS. Es el cálculo de la proporción de suministro y extracción del calor acumulado cuando se toman en cuenta la operación de los sistemas de aire acondicionado, los puntos determinados para la variación de temperatura y los horarios de calentamiento, enfriamiento y ventilación.

PLANT. Es la determinación de los requerimientos de combustible o energía del equipamiento primario como calentadores, evaporadores y generadores eléctricos, etc., en función de suministrar la energía demandada de los sistemas de aire acondicionado, dadas las características de eficiencia y operación del equipamiento.

ECONOMICS. Es el cálculo del costo de combustible y electricidad, tomando en cuenta el horario de uso del edificio.

Cada uno de estos sub-programas es independiente de los demás, pero deben correrse en un orden secuencial, así, por ejemplo, para poder utilizar el módulo de SYSTEMS, primero debe haberse corrido el módulo de LOADS, para correr PLANT, es necesario haber corrido primero LOADS y SYSTEMS, y así sucesivamente.

3.3 Diagramas de Flujo

En TRNSYS 13.1, un sistema se conforma por una serie de TYPEs, que deben seguir cierto orden de acuerdo a su interacción dentro del sistema. Los *types* son las subrutinas donde se describen cada una de las componentes del sistema, teniendo cada uno determinadas entradas y salidas. Las

entradas pueden estar dadas como valores constantes, o como salidas de otros TYPEs que debieron haber sido definidos anteriormente, es decir, que las salidas de un type pueden ser entradas de otros types o pueden ser los resultados requeridos por el usuario.

De este modo, un diagrama de flujo para un determinado edificio se puede representar gráficamente como se muestra en la fig. 3.3.1, donde:

- TYPE 9 es la subrutina que lee los datos de clima solicitados para la simulación,
- TYPE 33 convierte y ordena los datos de temperatura y humedad de tal manera que puedan ser utilizados por los types que los requieran,
- TYPE 16 calcula la radiación solar que incide sobre las diferentes orientaciones del espacio,
- TYPE 56, describe las características del (los) espacio(s).
- TYPE 28 ordena los resultados de acuerdo a los requerimientos del usuario, y
- TYPE 26 presenta los resultados solicitados por el usuario en forma de gráficas.

Cada type puede ser utilizado varias veces dentro de una simulación (excepto el TYPE 56), siempre y cuando se le asigne una unidad diferente, la cual no puede ser repetida dentro de una misma simulación.

En el caso del TYPE 56, antes de correr el archivo donde se incluyen y se relacionan los types (como lo muestra el diagrama de flujo), es necesario hacer la descripción del edificio en un archivo separado, que debe correrse con el subprograma BID (Building Input Description). En este sub-

programa se generan tres archivos, uno donde se determinan las entradas que el usuario debe indicar en el TYPE 56 y otros dos que son utilizados por el programa para realizar las corridas.

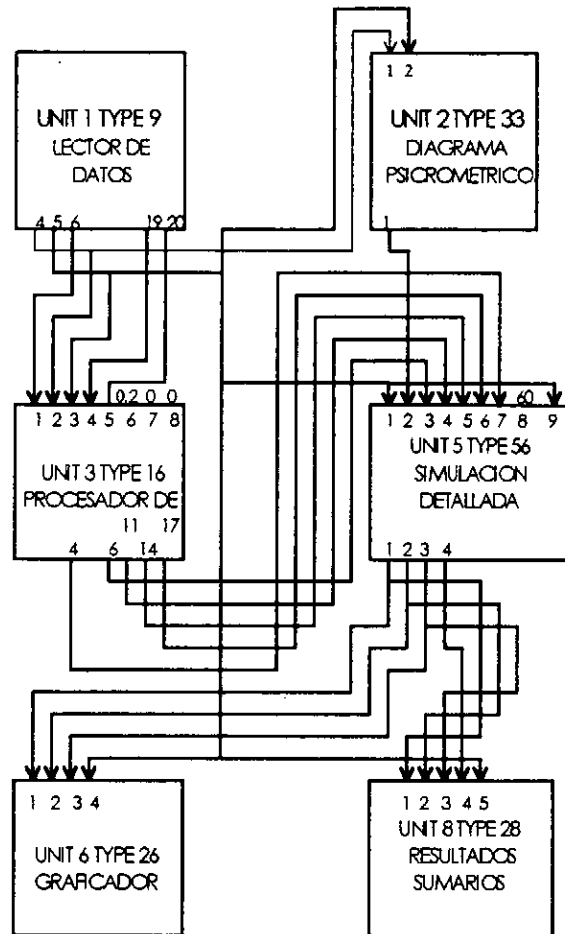


Figura 3.3.1. Diagrama de flujo para la simulación de un edificio en TRNSYS 13.1.

Los diagramas de flujo, para el caso de DOE-2.1E, son mucho más sencillos, pues sólo debe seguirse el orden lógico del programa. En la figura 3.3.2 se muestra un diagrama de flujo de DOE-2.1E que comprende todos los bloques del programa, en el cual se han remarcado los flujos para el cálculo de las cargas térmicas.

Como puede apreciarse, se pueden obtener resultados parciales de cada uno de los módulos (LOADS, SYSTEMS, PLANT y ECONOMICS) y en el orden en que están descritos, no es necesario crear los archivos de los siguientes módulos si no se requieren sus resultados, pues cada módulo realiza sus corridas de manera independiente.

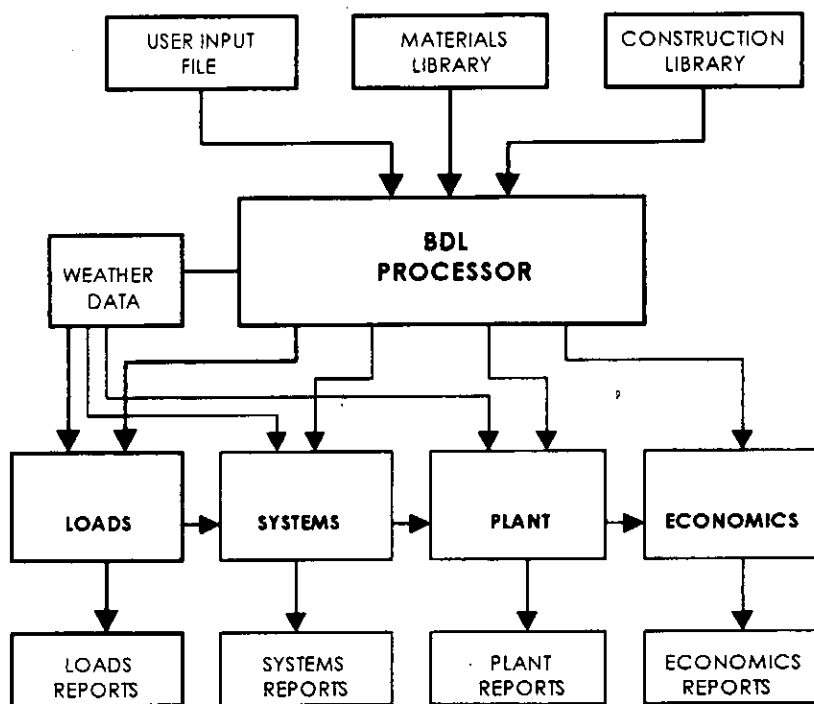


Figura 3.3.2. Diagrama de flujo para la simulación de un edificio en DOE-2.1E.

3.4 Metodologías

La característica de TRNSYS 13.1 para simular edificios en diferentes niveles de detalle (TYPE 12, TYPE 19 y TYPE 56), implica necesariamente tres metodologías distintas de cálculo térmico. Cada una de ellas toma como base diferentes parámetros y suposiciones que hacen imposible su

comparación detalladamente, por lo que en este capítulo se hará más bien un análisis de cada metodología por separado.

3.4.1 TRNSYS 13.1: Type 12.

El TYPE 12 es la modalidad más sencilla de simulación térmica en TRNSYS 13.1. Parte del concepto energía/(grado-día) desarrollado por la ASHRAE⁹, el cual ha demostrado ser útil en la estimación de la carga de calentamiento mensual de una estructura²¹.

En este modelo de carga de calentamiento del espacio, el concepto energía/(grado-día) se ha extendido a estimar la carga de calentamiento de una estructura hora por hora, de tal manera que el concepto se considera como energía/(grado-hora). Bajo estos intervalos de tiempo, a cada paso de la simulación se llevan a cabo balances de energía sencillos. Aunque se ha reconocido que la estimación de la carga térmica de ésta forma puede tener un error significativo²¹, el modelo proporciona una estimación de la carga de calentamiento del espacio con un mínimo esfuerzo computacional y puede ser aplicable para estimaciones aproximadas del consumo global de energía.

El TYPE 12 cuenta con cuatro modos distintos de operación, dos de los cuales modelan una estructura de capacitancia cero, mantenida a una temperatura determinada constante para calentamiento. Otro de los modelos utiliza una capacitancia térmica global y permite que la temperatura del cuarto fluctúe entre determinados puntos para calentamiento y enfriamiento. Cuando se rebasan los límites determinados de temperatura, el modelo presenta como salidas los requerimientos de energía para calentamiento o enfriamiento, dependiendo del caso. Un cuarto modo de operación también trabaja con la capacitancia global de la casa, pero considera además los

efectos que tendría la operación del equipamiento para calentamiento y/o enfriamiento así como un controlador. Los dos últimos métodos son los más indicados para la simulación térmica de un edificio, pero como en el presente trabajo no se contemplan sistemas de acondicionamiento de aire, sólo se hará el análisis del tercer modo, donde únicamente se consideran los requerimientos de energía para estos sistemas cuando la temperatura se sale de los rangos establecidos por el usuario.

En la modalidad que permite la oscilación de la temperatura con la posibilidad de incluir equipamiento auxiliar, la ecuación diferencial que describe la proporción del cambio de energía interna, por unidad de tiempo, de una estructura con una capacitancia global es:

$$CAP \frac{dT_R}{dt} = \gamma \varepsilon C_{\min} (T_i - T_R) + Q_{\text{gain}} - UA (T_R - T_a) \quad (3.4.1.1)$$

donde:

CAP = capacitancia de la estructura

$\gamma = 1$ si $m_1 > 0$,

o $\gamma = 0$ en cualquier otro caso

m_1 = proporción del flujo de la masa de aire que entra

ε = efectividad de la carga del intercambiador de calor

$C_{\min}$ = proporción mínima de capacitancia del fluido de la carga del intercambiador de calor.

T_i = temperatura del flujo de aire que entra

T_R = temperatura del cuarto

Q_{gain} = todas las ganancias de calor que varían con el tiempo

UA = constante en unidades de energía/(grado-hora), que caracteriza los requerimientos de calentamiento de una estructura especificada*.

T_a = temperatura del ambiente exterior

Esta ecuación se resuelve para la temperatura final (T_{RF}) y promedio (T_R) del cuarto para cada paso de tiempo. Se puede observar que si el cuarto no cuenta con equipamiento para el acondicionamiento de aire y no se considera ventilación y/o infiltración, la ecuación se reduce a la siguiente expresión:

$$CAP \frac{dT_R}{dt} = Q_{gain} - UA (T_R - T_a) \quad (3.4.1.2)$$

El cálculo de la energía requerida por el equipamiento, en caso de que la temperatura del cuarto se salga de los rangos establecidos por el usuario, se lleva a cabo de la siguiente manera:

Si $T_{RF} < T_{min}$

$$T_{RF} = T_{min}$$

$$T_R = T_{RC} \cdot \frac{\Delta t_c}{\Delta t} + T_{min} \left(1 - \frac{\Delta t_c}{\Delta t} \right) \quad (3.4.1.3)$$

Si $T_{RF} > T_{max}$

$$T_{RF} = T_{max}$$

$$T_R = T_{RC} \cdot \frac{\Delta t_c}{\Delta t} + T_{max} \left(1 - \frac{\Delta t_c}{\Delta t} \right) \quad (3.4.1.4)$$

donde:

Δt = intervalo de tiempo de la simulación

* La definición ha sido tomada del manual de TRNSYS 13.1 (Klein et al., 1992)²¹.

Δt_c = período de tiempo dentro del intervalo de tiempo de la simulación en el cual la temperatura del cuarto se encuentra dentro del rango de confort

T_{min} = Temperatura determinada para calentamiento

T_{max} = Temperatura determinada para enfriamiento

T_{RC} = Temperatura promedio del cuarto durante el intervalo de tiempo dentro del rango de confort

En cualquier caso,

$$Q_T = \gamma \varepsilon C_{min} (T_i - \bar{T}_R) \quad (3.4.1.5)$$

$$Q_L = UA (\bar{T}_R - T_a) \quad , y \quad (3.4.1.6)$$

$$Q_{aux} = Q_L - Q_T + \frac{Cap (T_{RF} - T_{RL})}{\Delta t} \quad \text{si } > 0, \text{ o} \quad (3.4.1.7)$$

$$Q_{aux} = 0 \quad \text{en cualquier otro caso}$$

donde:

Q_T = la energía que es transferida dentro del espacio a través del intercambiador de la carga de calor al fluido de enfriamiento

Q_L = la pérdida de calor instantáneo de la estructura menos las ganancias internas

Q_{aux} = la energía auxiliar instantánea, y

T_{RL} = la temperatura al principio de cada paso de tiempo

La proporción a la cual la entrada de enfriamiento se usa para reducir la temperatura del cuarto (Q_{sens}) está dada por:

$$Q_{sens} = Q_T - Q_L + \frac{Cap (T_{RF} - T_{RL})}{\Delta t} \quad \text{si } > 0, \text{ o} \quad (3.4.1.8)$$

$$Q_{sens} = 0 \quad \text{en cualquier otro caso}$$

Cuando las cargas de grado/día se usan para cálculos de aire acondicionado, ASHRAE¹⁸ sugiere multiplicar la carga sensible por un factor constante para tomar en cuenta las cargas latentes. Para este propósito se puede emplear un parámetro opcional para la carga latente:

$$LHR = \frac{\text{carga latente}}{\text{carga total}} \quad (3.4.1.9)$$

La ASHRAE¹⁸ recomienda que las proporciones de (carga latente)/(carga sensible) sean de alrededor de 0.3, o $LHR = 0.23$. Las cargas de enfriamiento latente y total se calculan por:

$$Q_{cool} = \frac{Q_{sens}}{(1 - LHR)} \quad (3.4.1.10)$$

$$Q_{lat} = Q_{cool} - Q_{sens} \quad (3.4.1.11)$$

donde:

Q_{cool} = proporción de enfriamiento por el acondicionador de aire

Q_{lat} = la proporción a la cual la entrada de enfriamiento se usa para reducir la humedad del cuarto

3.4.2. TRNSYS 13.1 - TYPE 19.

En el TYPE 19, los muros son modelados usando las funciones de transferencia de la ASHRAE¹⁸ y al igual que en el TYPE 12, se considera la posibilidad de incluir los efectos de operación de un equipo de aire acondicionado, pero como se ha mencionado, ese aspecto no será tratado en este trabajo.

La metodología empleada por el TYPE 19 difiere marcadamente de la utilizada en el TYPE 12, pues el TYPE 19 permite separar las ganancias de calor de acuerdo al elemento de la construcción que se considere y/o a su fuente, de tal manera que las ecuaciones empleadas en este *type* corresponden a términos muy individuales, pudiéndose dividir en los siguientes apartados:

- a) Muros exteriores
- b) Divisiones interiores
- c) Muros entre zonas con diferentes temperaturas
- d) Ventanas
- e) Ganancias por radiación
- f) Espacio interior

a) Muros Exteriores:

Para modelar el flujo de calor a través de los muros exteriores, en el TYPE 19 se puede hacer en términos de una relación de función de transferencia, cuya expresión matemática se define de la siguiente manera:

$$\dot{q}_i = \sum_{h=0} b_{h,i} T_{sa,i,h} - \sum_{h=0} c_{h,i} T_{eq,i,h} - \sum_{h=1} d_{h,i} q_{i,h} \quad (3.4.2.1)$$

donde:

b_h , c_h y d_h = coeficientes de función de transferencia para los valores corrientes y previos de la temperatura sol-aire (T_{sa}), temperatura equivalente de la zona (T_{eq}) y flujo de calor (q_i).

$h = 0$ = el intervalo de tiempo corriente

$h = 1$ = la hora previa, y así sucesivamente.

T_{sa} = Temperatura sol-aire, que es la temperatura del aire exterior, la cual, en ausencia de todos los intercambios de radiación, daría la misma transferencia de calor a la superficie exterior como ocurre actualmente. Para un muro vertical, generalmente se expresa como:

$$T_{sa,i} = T_a + \frac{(\alpha I_T)_i}{h_{c,o}} \quad (3.4.2.2)$$

en la cual:

$$h_{c,o} = 5.7 + 3.8 W \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C) \quad (3.4.2.3)$$

donde:

W es la velocidad del viento en m/s.

T_{eq} = Temperatura equivalente. Es la temperatura del aire interior, la cual, en ausencia del intercambio de radiación con la superficie interior, le daría la misma transferencia de calor como actualmente ocurre. Está dada por la ecuación:

$$T_{eq,i} = T_z + \frac{s_i + \sum_{j=1}^N h_{r,ij} (T_{s,j} - T_{s,i})}{h_{c,i}} \quad (3.4.2.4)$$

donde:

T_z = Temperatura de la zona

s_i = la suma de todas las ganancias por radiación absorbidas por la superficie.

$h_{r,ij}$ = coeficiente de transferencia de calor radiante linearizado. Se usa para

considerar la radiación de onda larga entre las superficies de la zona. Para

efectos de la radiación de onda larga, todas las superficies se asumen como si

fueran de color negro, de modo que este coeficiente se calcula por la

ecuación:

$$h_{r,ij} = 4\sigma F_{ij} \bar{T}^3 \quad (3.4.2.5)$$

donde:

F_{ij} = factor de vista o *view factor* de la superficie i a la j

b) Divisiones Interiores.

Se considera como divisiones interiores a aquellos muros que están expuestos a las mismas condiciones en ambos lados, de tal manera que en su punto central se suponen adiabáticos. La ecuación empleada en este caso es:

$$\dot{q}_i = \sum_{h=0} (b_{h,i} - c_{h,i}) T_{eq,i,h} - \sum_{h=1} d_{h,i} \dot{q}_{i,h} \quad (3.4.2.6)$$

c) Muros entre Zonas con diferentes temperaturas

Los muros que dividen dos zonas con diferentes temperaturas son modelados de la misma forma que los muros exteriores, pero en lugar de utilizar la temperatura sol-aire se emplea la temperatura equivalente, que es la temperatura de la zona adyacente, la cual, en ausencia de todos los

intercambios de radiación, daría el mismo flujo de calor a la superficie interior de la zona adyacente como actualmente ocurre.

La simulación del flujo de calor, tanto en los muros exteriores como en las divisiones interiores y muros dividiendo zonas a diferentes temperaturas, también se puede expresar como una ecuación sencilla de transferencia de calor, la cual quedaría de la siguiente manera:

$$\dot{q}_i = h_{ci} (T_{s,i} - T_{eq,i}) \quad (3.4.2.7)$$

Esta última ecuación es sustituida en las fórmulas (3.4.2.1) y (3.4.2.6) y finalmente, para llevar a cabo los cálculos hora por hora, son arregladas en términos de la siguiente matriz:

$$[Z_{i,j}][T_{s,i}] = [X_i] \quad (3.4.2.8)$$

donde:

$Z_{i,j}$ = coeficiente que relaciona la transferencia de calor entre i y j.

$T_{s,i}$ = temperatura superficial interior del elemento i.

i = número de superficies + 1 (n+1), que es la temperatura del aire del espacio.

X_i = entradas que varían con el tiempo y afectan a $T_{s,i}$.

Al plantear el problema en estos términos, se hacen suposiciones simplificadas que derivan en la matriz $Z_{i,j}$ independiente del tiempo, de tal manera que la matriz es invertida una vez al principio de la simulación y almacenada para su uso posterior, quedando la ecuación simplemente como el producto de la matriz invertida $Z_{i,j}$ y el vector variante de tiempo X_i , de la siguiente manera:

$$[T_{s,i}] = [Z_{i,j}]^{-1} [X_i] \quad (3.4.2.9)$$

d) Ventanas

Las ventanas pueden ser modeladas de dos formas diferentes. En un modo se calculan internamente las ganancias de calor y la transmisión de la radiación solar. En este caso, la energía solar que pasa a través de la ventana está dada por el producto de la radiación solar incidente y la transmitancia, mientras que la conducción de calor a través de ella se calcula con la ecuación:

$$\dot{Q}_i = A_i U_{g,o,i} (T_a - T_{eq,i}) \quad (3.4.2.10)$$

donde:

A_i = área del elemento i

$U_{g,o}$ = coeficiente de transferencia de calor de la ventana incluyendo convección de las superficies interior y exterior. Este valor es dado como una entrada.

En el otro modo, tanto la energía solar transmitida como la ganancia térmica son dadas como entradas, para lo cual se puede usar el TYPE 35 (Ventanas con Aislamiento Variable).

e) Ganancias por Radiación.

En el interior del espacio, se considera que cada superficie tiene ganancias de calor por radiación debido a iluminación, gente y radiación solar a través de las ventanas. Se asume que la radiación solar directa que penetra al espacio incide sobre una superficie, la cual la refleja de manera difusa sobre otras superficies. Esta radiación difusa que se refleja sobre las demás superficies se calcula utilizando el factor de intercambio total de Beckman²¹.

Por otra parte, se considera que tanto la radiación difusa que entra por las ventanas, como la radiación proveniente de iluminación y personas, es isotrópica. Así mismo, se supone que todas las

superficies son absorbedores perfectos (cuerpos negros) hacia la radiación de iluminación y gente y se asume que del total de la energía sensible de la gente, un 70% proporciona ganancias por radiación.

f) Espacio Interior.

En el espacio interior intervienen varios factores que influyen en el comportamiento térmico del aire. Si se realiza un balance térmico de la zona, incluyendo cualquier mobiliario, se tendría:

$$\text{Cap} \frac{T_{ZF} - T_{ZI}}{\Delta t} = \sum_{j=1}^N h_{cj} A_j (T_{sj} - T_z) + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{inf} + 0.3 \dot{Q}_{spepl} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_z \quad (3.4.2.11)$$

donde:

h_{cj} = coeficiente de convección de la superficie j

A_j = área de la superficie j

T_{sj} = temperatura superficial del elemento j

T_z = temperatura del aire de la zona

$\dot{Q}_v$ = ganancias por ventilación, las cuales se expresan como:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v C_{pa} (T_v - T_z) \quad (3.4.2.12)$$

donde:

$\dot{m}_v$ = proporción de la masa del flujo de aire de la ventilación

C_{pa} = calor específico del aire

T_v = temperatura del aire de ventilación

T_z = temperatura del aire de la zona

En esta ecuación, el flujo de ventilación está dado como una entrada.

$\dot{Q}_{infl}$ = las ganancias por infiltración, que se calculan con la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{infl} = \dot{m}_{infl} C_{pa} (T_a - T_z) \quad (3.4.2.13)$$

En este caso, el flujo por infiltración se calcula como:

$$\dot{m}_{infl} = \rho_a V_a (K_1 + K_2 |T_a - T_z| + K_3 W) \quad (3.4.2.14)$$

donde:

ρ_a = la densidad del aire de la zona

V_a = el volumen de aire de la zona

K_1, K_2, K_3 = constantes empíricas. Algunos valores de estas constantes, para diferentes

calidades de construcción, se enlistan en el ASHRAE Handbook of

Fundamentals¹⁸ y también se presentan en el manual de TRNSYS 13.1²¹.

T_a = temperatura ambiental

T_z = temperatura de la zona

W = velocidad de viento

$\dot{Q}_{spepl}$ = ganancias de energía de la zona como producto de la energía sensible de las personas

$\dot{Q}_{int}$ = ganancias internas que no sean producto de la iluminación o personas

$\dot{Q}_z$ = ganancias de calor por convección provenientes de espacios adosados

Si se asume que la variación de temperatura de la zona es lineal sobre cada paso de tiempo de la simulación y las ganancias de energía por ventilación e infiltración se evalúan utilizando la última estimación de temperatura de la zona, la ecuación anterior puede ser arreglada en función de la matriz (3.4.2.9).

Por otra parte, del total de la energía sensible proporcionada por las personas, se asume que el 30% proporciona ganancias por convección al espacio, mientras que el 70% restante, como ya se mencionó, es cedido de manera radiante. El número de personas dentro del espacio es proporcionado como una entrada y tanto la cantidad de calor sensible como la latente producida por ellas está en base a la actividad que desarrollen dentro del espacio. En este sentido, los valores más comúnmente usados son los que aparecen en las tablas del ASHRAE Handbook of Fundamentals de 1981¹⁸, las cuales se presentan también en el manual de TRNSYS 13.1²¹.

3.4.3 TRNSYS 13.1-TYPE56 y DOE2.1E

Tanto el TYPE 56 de TRNSYS 13.1 como el módulo LOADS de DOE-2.1E, basan sus metodologías de cálculo térmico en las Funciones de Transferencia de la ASHRAE^{18,22}, no obstante, cada programa contiene suposiciones y arreglos particulares que los hacen diferentes a uno del otro. Para comprender de manera general ambos modelos, aquí se presenta un resumen de la metodología propuesta por la ASHRAE^{18,22}, por lo que se recuerda que no es estrictamente la empleada por los programas mencionados.

3.4.3.1 Método de Función de Transferencia

El concepto de función de transferencia fue desarrollado por Mitalas y Stephenson²³ y consiste en una simplificación de un balance térmico detallado, en el cual, en primer lugar se calcularon las temperaturas superficiales de los cuartos y las cargas de enfriamiento para numerosas construcciones que representaban oficinas, escuelas y viviendas típicas de construcción ligera, mediana y pesada.

Las ganancias de calor por radiación solar, conducción, iluminación, equipamiento y ocupantes fueron simuladas por pulsos de fuerza unitaria. Las funciones de transferencia para las construcciones típicas fueron calculadas como constantes numéricas, representando las cargas de enfriamiento correspondientes a los pulsos de excitación de entrada, de los cuales posteriormente se asumieron independientes. De este modo, en lugar de realizar un balance térmico detallado, el cálculo se hace con una simple multiplicación de las funciones de transferencia por una representación de series de tiempo de la ganancia de calor y la consecuente sumatoria de esos productos.

En general, las ganancias de calor de los espacios no equivalen a las cargas de enfriamiento de los mismos, ya que un incremento de la energía radiante dentro de un espacio, no causa inmediatamente un incremento en la temperatura del aire, sino que primero debe ser absorbida por los muros y otros elementos, causando un incremento en su temperatura superficial y posteriormente, por convección, se provoca un incremento en la temperatura del aire. Por esta razón, el cálculo de las cargas térmicas del espacio se lleva a cabo en dos pasos. En primer lugar, se calculan las ganancias o pérdidas de calor y en segundo término, las cargas de enfriamiento correspondientes, tomando en cuenta el almacenamiento de calor de la masa térmica del espacio.

3.4.3.2 Ganancias de Calor por Conducción a través de Muros y Techos Exteriores

Para llevar a cabo el cálculo de la ganancia térmica por conducción, en éste método se utiliza el concepto de la temperatura sol-aire* para representar la temperatura exterior, mientras que la temperatura interior se supone con un valor constante. Los coeficientes de transferencia de calor

* La temperatura sol-aire (t_e), es la temperatura de aire exterior, la cual, en ausencia de todos los intercambios de radiación, daría la misma transferencia de calor a la superficie exterior como ocurre actualmente.

interior y exterior también se estiman constantes, de tal manera que la ganancia de calor a través de un muro o techo se calcula por la siguiente ecuación:

$$q_{e,\theta} = A \left[\sum_{n=0} b_n (t_{e,\theta-n\delta}) - \sum_{n=1} d_n \left\{ (q_{e,\theta-n\delta}) / A \right\} - t_{rc} \sum_{n=0} c_n \right] \quad (3.4.3.1)$$

donde:

$q_{e,\theta}$ = ganancia de calor a través de muros o techos, a la hora de cálculo θ

A = área de la superficie interior del muro o techo

θ = hora a la cual se realiza el cálculo

δ = intervalo de tiempo

n = índice de la sumatoria (cada sumatoria tiene tantos términos como haya valores no despreciables de coeficientes)

$t_{e,\theta-n\delta}$ = temperatura sol-aire a la hora $\theta, -n\delta$

b_n, c_n, d_n = coeficientes de transferencia por conducción

t_{rc} = temperatura interior del espacio analizado (constante).

3.4.3.3 Ganancias de calor a través de Divisiones Interiores, Pisos y Plafones.

La ecuación para calcular la transferencia de calor a través de un elemento divisorio, entre un espacio acondicionado y otro con diferente temperatura, es básicamente la misma que para calcular el flujo de calor a través de muros y techos exteriores, sólo que en lugar de emplear la temperatura sol-aire (t_e), se utiliza la temperatura del espacio adyacente (t_b), quedando de la siguiente manera:

$$q_{p,\theta} = A \left[\sum_{n=0} b_n (t_{b,\theta-n\delta}) - \sum_{n=1} d_n \left\{ (q_{p,\theta-n\delta}) / A \right\} - t_{rc} \sum_{n=0} c_n \right] \quad (3.4.3.2)$$

donde:

$q_{p\theta}$ = ganancia de calor del elemento divisorio, a la hora de cálculo θ

t_b = temperatura del aire del espacio adyacente

Cuando la temperatura (t_b) es constante, o sus variaciones son pequeñas comparadas con la diferencia entre las temperaturas del espacio adyacente y el cuarto en cuestión ($t_b - t_{rc}$), el cálculo de ($q_{p\theta}$) se lleva a cabo como un sistema en estado estable, por medio de la siguiente ecuación:

$$q_{p,\theta} = UA(t_b - t_{rc}) \quad (3.4.3.3)$$

donde:

U = coeficiente global de transferencia de calor entre el espacio adyacente y el acondicionado

En el caso de la transferencia de calor a través de superficies traslúcidas y del calor generado por diversos elementos en el interior del espacio, ambos son calculados directamente para la hora de interés, como se muestra más adelante.

3.4.3.4 Ganancias de Calor a través de Superficies Traslúcidas.

La ganancia total de calor, de manera instantánea, debida a la incidencia de la radiación solar a través de una superficie traslúcida, está dada por la suma del flujo de calor debido a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, de la radiación transmitida a través de la superficie y del flujo de la porción de la radiación absorbida por el vidrio hacia el interior del espacio, tal como se esquematiza en el capítulo 2 (fig. 2.1.3).

El flujo de calor debido a la diferencia de temperaturas (conducción) se presenta independientemente de que exista o no radiación directa y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q=UA(t_o - t_i) \quad (3.4.3.4)$$

donde:

U = coeficiente global de transferencia de calor del vidrio

A = área de la superficie

T_o = temperatura del aire exterior

T_i = temperatura del aire interior

Las ganancias de calor debidas a la radiación transmitida y absorbida por la superficie traslúcida dependen de la radiación solar directa y se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$q= A(SC)(SHGF) \quad (3.4.3.5)$$

donde:

SC = Coeficiente de sombreado del vidrio utilizado, dado por la siguiente relación:

$$SC = \frac{\text{Coeficiente de ganancia de calor solar del vidrio utilizado}}{\text{Coeficiente de ganancia de calor solar de un vidrio de referencia}} \quad (3.4.3.6)$$

Las características térmicas del vidrio de referencia son: transmitancia (τ) = 0.86, reflectancia (ρ) = 0.08 y absorptancia (α) = 0.06, siendo el coeficiente de ganancia de calor solar del vidrio de referencia (SHGF) el siguiente:

$$SGHF = (\tau + N_i \alpha) = 0.87 \quad (3.4.3.7)$$

donde:

SHGF = factor de ganancia de calor solar. Depende de la orientación, latitud, hora y mes para los cuales se esté llevando a cabo el cálculo.

N_i = fracción de calor absorbido por el vidrio y que fluye hacia el interior del espacio por convección. El valor de N_i está dado por la siguiente fórmula:

$$N_i = \frac{U}{h_o} \quad (3.4.3.8)$$

siendo U = coeficiente global de transferencia de calor del vidrio y h_o = coeficiente de convección exterior.

El valor de $SHGF = 0.87$, corresponde a condiciones estándar de verano para una incidencia normal, de acuerdo a las especificaciones de la ASHRAE⁹.

3.4.3.5 Ganancias Internas de Calor

Las ganancias de calor generadas dentro del espacio pueden proceder de diversas fuentes: personas, iluminación, equipamiento y accesorios. En algunos casos, estas ganancias pueden dividirse a su vez en ganancias de calor sensible y ganancias de calor latente, dependiendo de si implican o no un incremento o decremento de humedad.

Personas

En el caso de las ganancias de calor producidas por la presencia de personas, el calor puede ser sensible o latente y se calcula por las siguientes expresiones:

$$q_{\text{sensible}} = (N)(\text{Ganancia de Calor Sensible}) \quad (3.4.3.9)$$

$$q_{\text{latente}} = (N)(\text{Ganancia de calor Latente}) \quad (3.4.3.10)$$

en las cuales:

N = número de personas dentro del espacio

Las ganancias de calor sensible y latente dependen de la actividad que estén realizando las personas y existen diversas fuentes donde se pueden consultar.

Iluminación

Aunque el calor generado por la iluminación, en cualquier momento, es ligeramente diferente del calor equivalente a la potencia que le es suministrada instantáneamente, el cálculo se vuelve un poco más complejo, debido a que del total de la energía de la iluminación, una parte es en forma de calor convectivo y el resto es en forma de radiación.

La parte convectiva de la energía se considera inmediatamente como una carga para el equipo de aire acondicionado, pero la porción radiante es en primer lugar absorbida por los muros, pisos y mobiliario y posteriormente re-radiada dentro del espacio. Si se considera la inercia térmica de dicho espacio, habrá parte de la energía que será re-radiada después de haber sido apagada la iluminación, sin embargo, la cantidad de energía almacenada es pequeña y se puede considerar convectiva para efectos de cálculo. De este modo, únicamente se considerará la ganancia de calor instantánea como producto de esta variable, mediante la siguiente expresión:

$$q_{ei} = WF_{ul}F_{sa} \quad (3.4.3.11)$$

donde:

q_{ei} = ganancia de calor

W = potencia total de la iluminación. Se obtiene para el total de las lámparas instaladas.

F_{ul} = factor de uso de la iluminación. Se obtiene para el total de las lámparas instaladas.

F_{sa} = factor de tolerancia especial de la iluminación. Se aplica para las lámparas fluorescentes o para instalaciones donde las lámparas están ventiladas o colocadas de tal manera que sólo una

parte del calor que generan entra dentro del espacio acondicionado. En este caso, los fabricantes deben proporcionar los datos referentes al porcentaje de calor que entra al espacio.

Equipamiento

La carga de calor instantánea proveniente del equipamiento se determina de manera general por la ecuación:

$$q_{em} = 746 \cdot (P/E_M)(F_{UM})(F_{LM}) \quad (3.4.3.12)$$

donde:

q_{em} = flujo de calor equivalente de operación del equipamiento en Watts

P = potencia del equipamiento, en caballos de fuerza.

E_M = eficiencia del motor, como fracción decimal <1.0

F_{UM} = factor de uso del motor, 1.0 o fracción decimal <1.0

F_{LM} = factor de carga del motor, 1.0 o fracción decimal <1.0

El factor de uso se aplica cuando el motor opera de manera intermitente durante todo el día, considerando que de trabajar en forma continua este valor será = 1.0.

El factor de carga es utilizado para calcular la proporción de la carga del motor que afectará la carga del equipo de acondicionamiento del aire y depende de la ubicación del motor y la máquina que éste opera. Cuando tanto el motor como la máquina se encuentran dentro del espacio acondicionado, se aplica la ecuación 3.4.3.12, pero si el motor se encuentra fuera del espacio o del flujo de aire, la ecuación correspondiente será:

$$q_{EM} = 746P(F_{UM})(F_{LM}) \quad (3.4.3.13)$$

Si el motor está dentro del espacio acondicionado, pero la máquina se encuentra afuera, la ecuación será:

$$q_{EM} = 746P[1.0 - E_M/E_M(F_{UM})(F_{LM})] \quad (3.4.3.14)$$

Las eficiencias de los motores eléctricos generalmente son proporcionadas por los fabricantes, pero se cuenta también con datos promedio tabulados por la ASHRAE basados en las eficiencias de algunos motores eléctricos típicos.

Accesorios

Las estimaciones de las ganancias de calor como producto de diversos accesorios es muy subjetiva, debido principalmente a la diversidad de las aplicaciones, itinerarios e instalaciones que se pueden presentar. Algunas de las funciones más comunes en espacios acondicionados donde se consideran estos elementos son por ejemplo: preparación de comida, hospitales y laboratorios y oficinas.

Aunque las consideraciones para cada caso varían, se pueden establecer, de manera general, las siguientes ecuaciones para calcular las ganancias de calor derivadas de diversos accesorios.

$$q_{sensible} = q_{is}F_{ua}F_{ra} \quad (3.4.3.15)$$

o

$$q_{sensible} = (q_{is}F_{ua}F_{ra})/F_{\Pi} \quad (3.4.3.16)$$

$$q_{latente} = q_{il}F_{ua} \quad (3.4.3.17)$$

donde:

q_{is} = ganancia de calor sensible proporcionado por los accesorios

F_{ua} = factor de uso. Depende de la frecuencia con que son usados los accesorios

F_r = factor de radiación. Este factor es importante en los casos de preparación de comida, donde se considera que cuando se cuenta con un extractor efectivo, el calor que proviene en forma radiante de las superficies de los accesorios y utensilios de cocina equivale al 32% de la entrada máxima horaria de calor y es el único que afectará a la carga de enfriamiento del espacio, mientras que la energía convectiva y latente es despreciable.

F_d = factor de pérdida de flujo

q_{il} = ganancia de calor latente de los accesorios.

La ASHRAE^{18,22} cuenta con datos tabulados de eficiencias y factores de uso comunes para accesorios de cocinas, hospitales, laboratorios y oficinas, en caso de que no se cuente con dicha información.

Ventilación e infiltración

El intercambio de aire entre el interior y el exterior de un espacio o edificio, se puede llevar a cabo de dos maneras diferentes, ya sea por ventilación o por infiltración. La principal diferencia entre ellas radica en la forma en que se llevan a cabo.

La ventilación es controlable, se produce de manera intencional a través de aberturas en la envolvente del edificio y puede ser natural o forzada. Es natural cuando el intercambio de aire se debe únicamente a la presión del viento o a diferencias de temperatura entre el aire interior y el exterior, pero cuando interviene de manera intencional algún mecanismo, como ventiladores o extractores que realizan el intercambio de aire bajo ciertas especificaciones, se denomina ventilación forzada.

La infiltración, por su parte, es un intercambio de aire no intencionado e incontrolable que se lleva a cabo a través de grietas, rendijas y otras aberturas no intencionales. Al igual que la ventilación, la infiltración se produce por la presión del viento y/o la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, pero no es adecuada para ventilar un espacio porque depende de las condiciones del clima y de la ubicación de las aberturas, que además son muy pequeñas para proporcionar un adecuado intercambio de aire.

El intercambio de aire incrementa generalmente entre el 20 y el 40% la carga térmica de un edificio, debido a las siguientes razones:

1. El aire que entra al espacio debe ser modificado de la temperatura del aire exterior a la temperatura del aire interior. La energía requerida para llevar a cabo este proceso se calcula mediante la ecuación:

$$q_s = 60 Q \rho c_p \Delta t \quad (3.4.3.18)$$

donde:

q_s = carga de calor sensible

Q = cantidad de flujo de aire

ρ = densidad del aire

c_p = calor específico del aire

Δt = diferencia de temperatura entre el aire interior y el aire exterior

2. El intercambio de aire modifica el contenido de humedad del aire interior del edificio, generando una carga de energía latente, la cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_l = 60 Q \rho h_{fg} \Delta W \quad (3.4.3.19)$$

en la cual:

q_l = carga de calor latente

h_{fg} = calor latente del vapor a una temperatura apropiada dl aire

ΔW = humedad absoluta del aire interior menos la humedad absoluta del aire exterior

Carga de Enfriamiento

Para tomar en cuenta el efecto del almacenamiento térmico en la conversión de ganancias de calor a cargas de enfriamiento, en el método de Función de Transferencia se aplica una segunda serie de factores de carga (weighting factors) o de coeficientes de función de transferencia del espacio (room transfer functions -RTF-), los cuales se aplican a las ganancias de calor y a los valores de la carga de enfriamiento de todos los elementos que contienen componentes radiantes una vez que se han calculado las ganancias de calor dentro de los espacios.

Los coeficientes de función de transferencia del espacio o *room transfer functions*, dependen de la naturaleza de las ganancias de calor (conducción a través de muros, radiación solar directa y difusa a través de las ventanas, etc.) y de las características de almacenamiento térmico del espacio (muros, pisos, etc.), así como de los elementos contenidos en él.

Cuando la ganancia térmica de calor (q_θ) esta dada en intervalos iguales de tiempo, la carga de enfriamiento correspondiente (Q_θ) a la hora θ puede estar relacionada con el valor corriente de q_θ y a los valores previos de la carga de enfriamiento y ganancia de calor dada por:

$$Q_\theta = \sum_{i=1} (v_0 q_{\theta,i} + v_1 q_{\theta,i-\delta} + v_2 q_{\theta,i-2\delta} + \dots) - (w_1 Q_{\theta-\delta} + w_2 Q_{\theta-2\delta} + \dots) \quad (3.4.3.20)$$

donde:

i = desde 1 hasta el número de componentes de ganancias de calor

δ = intervalo de tiempo

$v_0, v_1, v_2, \dots, w_1, w_2, \dots$ = coeficientes de RTF

Los elementos que no proporcionan ganancias de calor por radiación a la carga de enfriamiento, contribuyen directamente a las ganancias de calor convectivo de manera instantánea. Esta carga de enfriamiento es agregada a las cargas que han sido procesadas por medio de los coeficientes de función de transferencia por conducción (CTF) y los coeficientes de función de transferencia de espacios (RTF), mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{sc} = \sum_{j=1} (q_{c,j}) \quad (3.4.3.21)$$

en la cual:

Q_{sc} = carga de enfriamiento sensible de los elementos de ganancia de calor que sólo contienen componentes convectivas

q_c = cada uno de los elementos de ganancia de calor j que tienen únicamente componentes convectivas.

De manera similar, la carga de calor latente se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Latent } Q_l = \sum_{n=1} (q_{c,n}) \quad (3.4.3.22)$$

donde:

q_c = cada uno de los elementos de ganancia de calor latente n

3.5 Características de las Librerías

Para facilitar su manejo, los programas contienen algunas librerías con información que el usuario puede utilizar, accediendo a ellas por medio de códigos o palabras clave. El uso de éstas librerías se traduce en el ahorro de tiempo al describir una simulación, pero debido a que la información contenida en ellas es limitada, su aplicación se reduce a proyectos cuyas características estén comprendidas en las bases de datos. En caso de que las características del proyecto que se vaya a simular no coincidan exactamente con los contenidos de las librerías, se pueden hacer aproximaciones a las mismas, pero el margen de error en las salidas de la simulación se puede incrementar notablemente.

Generalmente la información comprendida en estas librerías corresponde a los estándares de los lugares donde han sido desarrollados los programas (en este caso los dos programas son desarrollados en Estados Unidos), de tal manera que su empleo para simular edificios en la República Mexicana puede ser muy limitado y aunque los simuladores cuentan también con generadores de datos, el desarrollo de éstos muchas veces parte de correlaciones de características muy específicas, por lo que su aplicación para casos con características diferentes, puede generar también errores considerables, incluso en el mismo país donde haya sido diseñado el programa.

Los simuladores contienen varios tipos de bases de datos y algunos procesadores para generarlos cuando no están disponibles, pero al llevar a cabo la simulación de un edificio, los que más pueden influir son los siguientes:

- Datos climáticos

- Procesadores de datos climáticos
- Procesadores de radiación solar
- Datos de materiales y sistemas constructivos

Para entender como pueden afectar estos archivos la ejecución y los resultados de una simulación, a continuación se describe cada uno de ellos.

3.5.1 Datos Climáticos

Tanto TRNSYS 13.1 como DOE-2.1E han sido creados y desarrollados en los Estados Unidos y por ende, sus bases de datos comprenden las características climáticas de un gran número de ciudades de ese país, sin embargo, no es posible incluir todos los datos necesarios para todas las ciudades, pues por trabajar los dos programas con información horaria para realizar las simulaciones, resultaría inmenso el número de datos que necesitarían tener almacenados (8760 datos para cada parámetro diferente: radiación, temperatura, humedad, etc., para cada ciudad). Por esta razón, los dos programas tienen procesadores de datos que leen la información de las ciudades contenidas en sus librerías y las convierten en archivos utilizables para llevar a cabo las simulaciones, basándose en diferentes parámetros que dependen del programa y de la información disponible en sus bases de datos.

TRNSYS 13.1 contiene la información de 329 localidades, de las cuales 96 ciudades son de Canadá y el resto de Estados Unidos. Los datos que tiene registrados en sus archivos corresponden a los valores promedio mensuales de los siguientes parámetros:

- Radiación solar global (tomada sobre una superficie horizontal)
- Temperatura de bulbo seco
- Humedad relativa

Estos parámetros deben ser procesados por el TYPE 54 para generar los datos horarios.

Los datos de las ciudades incluidas en TRNSYS 13.1 fueron tomados de la publicación *Input Data for Solar Systems*, por Cinquemani, Owenby y Baldwin, publicada por la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA) de E.U., en Ashville, NC.

DOE-2.1E, por su parte, contiene tres tipos de archivos climáticos en sus librerías de climas con la siguiente disponibilidad:

- Datos de un año de 60 estaciones climáticas diferentes seleccionadas de acuerdo al procedimiento del ASHRAE Test Reference Year (TRY)
- Datos de un año para 16 zonas climáticas en el Estado de California (California, CTZ), comprendiendo 117 ciudades.
- Archivos de 26 estaciones climáticas de Estados Unidos en el formato del Año Meteorológico Típico (TMY).

Además, DOE-2.1E tiene la facultad de procesar archivos del tipo CD144 y TD 1440 correspondientes a registros de estaciones aéreas y WYEC (Weather Year for Energy Computation), que son archivos disponibles de ASHRAE similares a los archivos del tipo TMY pero para lugares no incluidos en ellos.

Los archivos del tipo TRY, CTZ y TMY, si están comprendidos dentro del programa con todos los datos horarios anuales, pero en su disposición original no son utilizables por DOE-2.1E, por ello es necesario el uso de los procesadores de datos, tanto para estos archivos, como para los que proceden de estaciones aéreas.

Actualmente el Laboratorio de Lawrence Berkeley está contemplando la posibilidad de incluir dentro de las bases de datos de DOE-2.1E, registros de climas de la República Mexicana, sin embargo, los datos registrados son muy limitados, por lo que únicamente se tienen disponibles en el LBNL observaciones horarias obtenidas de tres años de las ciudades de México (templado central), Mérida (cálido-húmedo) y Monterrey (cálido- seco), obtenidos de los aeropuertos, así como el resumen de las estadísticas mensuales proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, las cuales deben ser extrapoladas para obtener los datos horarios necesarios para correr el programa.

Aunque los parámetros registrados en los diferentes archivos incluidos en DOE-2.1E son muchos y muy diversos, el programa requiere, para llevar a cabo una simulación, sólo los siguientes datos:

- Temperatura

- Humedad
- Velocidad de viento
- Ganancia solar (medida o interpolada de datos de nubosidad)
- Presión
- Dirección del viento

De estos parámetros, la presión y dirección del viento no son indispensables, pero si se tienen disponibles, se pueden utilizar para detallar más una simulación.

3.5.2 Procesadores de Datos Climáticos

Los procesadores de datos climáticos permiten estimar datos para las ciudades y latitudes que el usuario requiera, pero se debe tener cuidado de no creer ciegamente en sus resultados, pues algunas de sus correlaciones pueden limitar su aplicación a determinadas circunstancias, fuera de las cuales, el margen de error puede ser muy elevado.

El procesador de datos climáticos en TRNSYS 13.1 es el TYPE 54, que tiene como propósito generar datos típicos de un año sencillo, similar al Año Meteorológico Típico (TMY). Este generador requiere un archivo de datos externos que contenga los promedios mensuales de radiación, temperatura y humedad, el cual puede ser desarrollado por el usuario u obtenerse del archivo de datos climáticos incluidos en TRNSYS 13.1.

En el procesador, la radiación es descrita en términos del índice de claridad, que es la proporción de la radiación total sobre una superficie horizontal de la radiación solar global extraterrestre sobre una superficie horizontal al mismo tiempo. Los valores instantáneos pueden ser integrados sobre cualquier período de tiempo. Los valores de radiación difusa son calculados a partir de la correlación de fracción difusa de Erbs ²⁴.

Para generar los datos horarios de temperatura, se pueden utilizar dos modos diferentes. Uno de ellos utiliza coeficientes de valores reportados de datos climáticos de Albuquerque, NM, Madison, WI y Miami, FL. El otro modelo esta basado en funciones matemáticas.

Debido a que el primer modo se basa en los climas específicos de las ciudades mencionadas, para climas marcadamente diferentes (por ejemplo cálido húmedo), puede existir cierto margen de error. En el modelo matemático, los valores promedios y máximos diarios son obtenidos de una distribución normal, donde las principales desviaciones pueden estar dadas como entradas o ser estimadas a partir de correlaciones. Este modelo reproduce mejor la estructura diaria de la temperatura pero desprecia las variaciones de la secuencia horaria.

La humedad relativa es estimada con un modelo de temperatura de punto de condensación donde las entradas de la proporción de humedad son convertidas a promedios mensuales de temperaturas de punto de condensación y ordenadas de acuerdo a una secuencia. Las temperaturas de punto de condensación y humedad relativa horaria son calculadas a partir de las depresiones de punto de condensación estimadas con un algoritmo de acuerdo a las horas correspondientes a las temperaturas de bulbo seco máxima y mínima diarias.

La velocidad de viento no es un valor imprescindible para TRNSYS 13.1. Si no se introduce, el programa asume que el promedio mensual de la velocidad del viento es de 4m/s, y a partir de este valor calcula los valores diarios con variaciones del 31%. Los valores horarios se calculan aleatoriamente con una desviación estándar de 35% a partir del valor promedio diario. Es conveniente observar que 4m/s es una velocidad de viento muy fuerte para la mayoría de las ciudades de la República Mexicana, por lo que se debe tener cuidado con esta variable. La dirección que tendrá este flujo de viento estimado por TRNSYS 13.1, que sin lugar a dudas juega un papel importante en diversos cálculos de la transferencia de calor, no se menciona en ningún momento, haciendo suponer que el programa considera que el viento fluye a la misma velocidad sobre todas las fachadas del edificio, lo cual en la realidad, tampoco sucede.

DOE-2.1E tiene disponibles cuatro programas para procesar los datos climáticos, cuyas funciones varían de acuerdo a las necesidades del usuario. Los programas actúan de la siguiente manera:

- **PACK.** Es el programa que procesa, además de los tres tipos de archivos climáticos que contienen las librerías de DOE-2.1E (TMY, TRY y CTZ), la información de archivos del tipo CD144, TD1440 y WYEC, ya que ninguno de los formatos de estos registros es legible por el programa en su forma original. En caso que los datos de clima requeridos por el usuario no se encuentren en las librerías de DOE-2.1E, o en alguna de las otras fuentes mencionadas, existe la posibilidad de crearlos usando los programas de procesamiento.
- **LIST.** Sustrahe e imprime datos de los archivos de clima para cualquier período especificado por el usuario.

- **EDIT.** Edita un determinado archivo de clima, donde el usuario puede cambiar la información de acuerdo a sus intereses particulares. Es posible cambiar hasta 336 horas de datos en una corrida (dos semanas).
- **STAT.** Lee y comprime archivos de clima para producir un resumen estadístico anual.

3.5.3 Procesadores de Radiación Solar

En TRNSYS 13.1 la radiación solar es generada de manera horaria por el TYPE 54, considerándola como la radiación global incidente sobre una superficie horizontal, y es procesada en el TYPE 16 para generar los datos horarios de radiación solar directa y difusa. En caso de contar con la información de las componentes directa y difusa de la radiación solar, ésta se puede introducir directamente usando otra metodología dentro del mismo *type*.

El TYPE 16 calcula también la posición del sol y estima la insolación hasta en cuatro superficies de distinta orientación interpolando los datos de radiación. Si el edificio de estudio cuenta con fachadas en más de cuatro orientaciones, el TYPE 16 se puede incluir varias veces.

En caso de contar únicamente con la radiación total horizontal, a partir de ella es factible calcular, por medio de cinco distintos modos, las componentes directa y difusa sobre una superficie horizontal. Los cinco métodos disponibles son:

- la relación de Liu y Jordan²⁵,
- la relación de Boes et al.²⁶,
- la relación de ERBS²⁴
- una forma reducida de la correlación de Reindl²⁷
- la relación de Reindl²⁷

La relación de Liu y Jordan²⁵, es una relación entre la radiación difusa diaria y la radiación total diaria, pero es usada por el programa como una relación horaria; la forma reducida de la correlación de Reindl²⁷ utiliza el índice de claridad y el ángulo de altitud solar para estimar la fracción difusa y la relación completa estima la fracción difusa como una fracción del índice de claridad, del ángulo de altitud solar, de la temperatura ambiente y de la humedad relativa.

En el caso de DOE-2.1E, ninguno de los archivos de clima de TRY o de California contienen datos de radiación solar medidos, pero sí contienen los datos de nubosidad, a partir de los cuales se puede calcular la radiación. Para este efecto se pueden utilizar dos metodologías:

1. Por medio del modificador de cobertura de nubes de Boeing, en el programa LOADS se pueden calcular los valores horarios de radiación a partir de los datos de cobertura de nubes, y
2. Únicamente para archivos del tipo TRY, se utiliza el modelo modificador de cobertura de nubes de Kimura-Stephenson; el inconveniente de este modelo es que fue desarrollado a partir de una comparación de datos solares medidos, con constantes de cobertura de nubes para una localidad

cerca de Ottawa, Canadá, usando datos de claridad de Ottawa, y por lo tanto, para climas diferentes a los de esta ciudad, se puede tener un margen de error.

Como puede apreciarse, los dos programas requieren, de manera obligatoria, prácticamente las mismas variables climáticas (temperatura, humedad y radiación), pero existen importantes diferencias en su disposición: TRNSYS 13.1, únicamente contiene, dentro de sus bases de datos de climas, la radiación solar global, a partir de la cual, el procesador de datos (TYPE 16) puede obtener las componentes directa y difusa necesarias para realizar las simulaciones. En el caso de DOE-2.1E, los archivos ya contienen los datos de radiación solar directa y difusa, o en su defecto, cuentan con datos de nubosidad, a partir de los cuales los procesadores obtienen las componentes difusa y directa de la radiación solar.

3.5.4 Datos de Materiales y Sistemas Constructivos

TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E tienen como base de datos común, las tablas de materiales y composiciones constructivas predefinidas por la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE^{15,19}), a las cuales es posible acceder a través de diversos códigos y/o palabras clave.

En TRNSYS 13.1, esta librería se usa solamente en el caso del TYPE 19 para una simulación detallada de un espacio. Aunque la librería no aparece como un archivo de datos, el usuario accede a ella por medio de los números de código indicados en las tablas de *coeficientes de función de transferencia* de la ASHRAE (Handbook of Fundamentals 1977²² o de las tablas 28 o 29 del capítulo 26 del ASHRAE Handbook of Fundamentals 1981¹⁸) para elementos predefinidos como

techos, muros exteriores y divisiones interiores. Las funciones de transferencia correspondientes a estos datos están en el archivo ASHRAE.COF, que es accesado por el programa al principio de la simulación. En caso de que las características del edificio no coincidan con los parámetros del ASHRAE, se puede hacer una aproximación a éstas o se pueden introducir de manera independiente.

Para los casos de los TYPEs 12 y 56, el usuario introduce los datos de manera diferente, en el TYPE 12, como ya se mencionó, a través de la capacitancia total del edificio y en el TYPE 56 se introducen las características de cada material en el subprograma BID, como se verá más adelante.

DOE-2.1E también puede acceder a las tablas de *coeficientes de función de transferencia* de la ASHRAE, pero en su caso se hace a través de las palabras código indicadas en la tabla de Propiedades Térmicas y números de código de las capas usadas en los cálculos de coeficientes para muros y techos (tabla 8, cap. 25 Handbook of Fundamentals 1977²²). DOE-2.1E tiene además otra librería con características termofísicas predeterminadas de materiales constructivos, materiales de aislamiento, películas de aire y espacios de aire, asociados con palabras código propias de DOE-2.1E.

Al igual que TRNSYS 13.1, DOE-2.1E permite introducir la información para sistemas constructivos de composiciones que no coincidan con sus bases de datos. Esta característica le da a los dos programas la facultad de ser utilizados para cualquier composición constructiva por arbitraria que ésta sea, pero hay que tener en consideración las características con las que los programas procesan esta información, como las características de los materiales usados para

desarrollar las correlaciones para generar los coeficientes de función de transferencia, ya que si los materiales introducidos por el usuario difieren marcadamente de dichas características, los coeficientes de transferencia generados por los programas podrán estar muy lejos de lo deseado.

3.6 Características de las Entradas de los Simuladores

En el capítulo 3.3, al describir los diagramas de flujo, se puede observar que la estructuración de TRNSYS 13.1 es hasta cierto punto diferente a la de DOE-2.1E. Estas diferencias se dan debido a la modularidad de TRNSYS 13.1, que le permite incluir diversos aspectos referentes al edificio dentro de un mismo archivo de entradas, que al correrlo, arroja un sólo archivo de salidas, con excepción del TYPE 56, donde se utiliza también el programa BID, para describir de manera detallada el edificio. A diferencia de TRNSYS 13.1, en DOE-2.1E es necesario elaborar varios archivos (LOADS, SYSTEMS, PLANT y ECONOMICS) que se corren de manera independiente, arrojando cada uno sus propias salidas, sin embargo, debido a que el presente trabajo está enfocado particularmente a la simulación del edificio y no a la de los equipos de aire acondicionado u otros, sólo se tomará en cuenta el procesador del módulo de LOADS (LDL) y el procesador del lenguaje de descripción del edificio (BDLCTL). De esta manera, la caracterización de las entradas de los dos programas se puede dividir en dos partes principales:

- a) las instrucciones que dirigen al programa para realizar una simulación, y
- b) las entradas propiamente, que definen el edificio a simular.

A pesar de que las funciones de las instrucciones son diferentes a las de las entradas, es necesario el análisis y la comparación de ambas debido a que las características de las entradas (y de las salidas) dependen totalmente de las instrucciones.

MODELO	INSTRUCCIONES	ENTRADAS
TRNSYS 13.1	1. Estatutos de control de la simulación 2. Estatutos de control de listados	1. Estatutos de control de las componentes
DOE-2.1E	1. Procesador de control (BDLCTL)	1. Procesador de entradas

Tabla 3.6.1 Tipos de entradas de los simuladores.

3.6.1 Características de las Instrucciones

En TRNSYS 13.1, las instrucciones están dadas por los “estatutos de control de la simulación” y los “estatutos de control de listados”, que le indican al programa los límites de la simulación y el formato de las salidas respectivamente, mientras que en DOE-2.1E, las instrucciones del programa BDL (Building Description Language) son procesadas únicamente por el procesador de control BDLCTL (ver tabla 3.6.1).

En el caso de las instrucciones de TRNSYS 13.1 primero hay que aclarar que son dos los tipos de entradas e instrucciones que hay que definir, en primer lugar aquellas concernientes al archivo de descripción (*deck*) donde se deben interrelacionar los TYPEs que componen el sistema y en segundo lugar, las que corresponden al programa BID (Building Input Description), que es la modalidad más detallada y comparable a DOE-2.1E.

Con respecto a las instrucciones del *deck*, los estatutos de control de la simulación y de listados están dados por palabras clave, las cuales le indican al programa las características o condicionantes

bajo las cuales se llevará a cabo la simulación. Estas palabras clave operan para la simulación de cualquier sistema o TYPE, incluyendo el TYPE 56 y se mencionan en la tabla 3.6.2, así como sus funciones. Estas instrucciones son similares a algunas que maneja DOE-2.1E, aunque su ubicación dentro del archivo puede tener una secuencia diferente. En la tabla 3.6.3 se pueden ver características de las instrucciones de DOE-2.1E.

PALABRA CLAVE	FUNCIONES	JERARQUÍA
SIMULATION	Determina el inicio y final de la simulación.	Obligatoria
TOLERANCES	Especifica el porcentaje de tolerancias de errores que se permitirán para poder realizar la simulación.	Opcional
LIMITS	Determina los límites en el número de interacciones.	Opcional
CONSTANTS	Determina valores constantes que pueden usarse varias veces.	Opcional
EQUATIONS	Permite que las variables sean definidas como funciones algebraicas.	Opcional
ACCELERATE	Especifica a TRNSYS 13.1 el uso de métodos numéricos de convergencia para los valores especificados de las salidas.	Opcional
LOOP-REPEAT	Permite al usuario tener cierto control de las ordenes de las componentes durante la simulación.	Opcional
DFQ	Permite al usuario seleccionar un algoritmo determinado para resolver ecuaciones diferenciales.	Opcional
NOCHECK	Permite checar por convergencia hasta 20 entradas diferentes (del estatuto de INPUTS).	Opcional
ASSIGN	Permite asignar o asociar archivos a unidades lógicas del archivo de descripción (deck) de TRNSYS 13.1.	Opcional
WIDTH	Determina el número de caracteres que se permitirán en una línea de salidas de TRNSYS 13.1.	Opcional
NOLIST	Indica que no se imprima un determinado listado de TRNSYS 13.1	Opcional
LIST	Indica que se imprima el listado que sigue, después de haber usado la instrucción NOLIST	Opcional
MAP	Se usa para obtener un listado de las componentes	Opcional
*	Se usa para indicar que la información que sigue es sólo un comentario y no es simulado, pero si aparece al imprimir el archivo y/o las salidas	Opcional
END	Es la última instrucción de TRNSYS 13.1 que indica que ya no va a haber más instrucciones y que la simulación puede iniciar.	Obligatoria

Tabla 3.6.2 Características de las Instrucciones y Palabras Clave de TRNSYS 13.1.

PALABRA CLAVE	FUNCIONES	JERARQUÍA
INPUTS	Indica que las instrucciones que siguen contienen datos para un programa particular (INPUT LOADS)	Obligatoria
PARAMETRIC INPUT	Indica que las instrucciones que siguen consisten solo en modificaciones paramétricas de los datos introducidos siguiendo las instrucciones previas para el mismo programa	Obligatoria
DIAGNOSTICS	se usa para especificar varias opciones acerca de las instrucciones de impresión y mensajes de diagnóstico	Opcional
ERRORS	Solo se imprimen mensajes de errores	Opcional
WARNINGS	SE imprimen errores y advertencias	Opcional
CAUTIONS	Se imprimen mensajes de errores, advertencias y precauciones	Opcional
DEFAULTS	Igual que CAUTIONS, mas la impresión de todos los valores usados por default	Opcional
COMMENTS	Igual que DEFAULT mas la impresión de mensajes informativos (este es el valor por default)	Opcional
WIDE	Los mensajes son formateados de acuerdo a las terminales de las impresoras (este es el valor por default)	Opcional
NARROW	Los mensajes son formateados para impresoras y terminales que tengan hasta 80 caracteres	Opcional
SINGLE-SPACED	Las instrucciones son repetidas en espacios sencillos	Opcional
DOUBLE-SPACED	Las instrucciones son repetidas en espacios dobles	Opcional
ECHO	Todas las instrucciones son repetidas en la lista de salidas	Opcional
NO-ECHO	Las instrucciones no son repetidas	Opcional
NO-LIMITS	El programa ignora las palabras clave de valores máximos y mínimos en el procedimiento de edición de datos y no imprime mensajes de precaución para valores especificados fuera de su rango normal.	Opcional
LIMITS	El programa usa los rangos establecidos por el usuario (este es el valor por default)	Opcional
LIBRARY-CONTENTS	Se imprimen los contenidos de las librerías empleadas por el usuario.	Opcional
-	no se imprimen los contenidos de las librerías empleadas por el usuario (este es el valor por default)	
ABORT	Determina el nivel de Diagnostico en las siguientes instrucciones	Obligatoria
TITLE	Se Permiten hasta cinco líneas de titulo al principio de un archivo.	Opcional
PARAMETER	se usa para especificar variables especificadas por el usuario como corridas paramétricas y asignarles valores. (máximo 50)	Obligatoria
SET-DEFAULT	se usa para asignar un valor por default a una o más palabras clave dentro de una instrucción particular.	
END	indica que todos los datos para un programa particular han sido introducidos.	Obligatoria
S	Se usa para indicar que la información que sigue es sólo un comentario y no es simulado, pero si aparece al imprimir el archivo y/o las salidas	Opcional
STOP	Indica que el final de todas las entradas para todos los programas han sido introducidas.	Obligatoria
COMPUTE	Es la orden para que el modelo inicie las simulaciones.	Obligatoria

Tabla 3.6.3 Características de las Instrucciones y Palabras Clave de DOE-2.1E.

Períodos para Realizar Simulaciones

En ambos programas se puede especificar el período del año para realizar una simulación, pero la flexibilidad para definirlo varía entre ellos. En TRNSYS 13.1, mediante la palabra clave **SIMULATION**, se indica la hora del año de inicio, la hora del año de conclusión de la simulación y los lapsos de tiempo que se hará la integración numérica, que puede ser horario, o en múltiplos o submúltiplos de hora. En DOE-2.1E el período se indica con la instrucción **RUN-PERIOD**, con el cual se indican la fecha de inicio y la fecha de conclusión de la simulación, y el programa asume la hora 1.00 del día de inicio y la hora 24 del último día como las horas de inicio y conclusión de la simulación, respectivamente, pero DOE-2.1E permite además, especificar hasta doce períodos diferentes dentro de un año para realizar una simulación, mientras que TRNSYS 13.1 sólo permite un período.

Mensajes de Errores

Siempre que existan errores en los archivos de simulación, será imposible correr cualquiera de los dos programas. El tratamiento de estos errores también es variable. En TRNSYS 13.1, mediante la palabra clave **TOLERANCES**, se puede indicar al programa el porcentaje de errores que se pueden permitir para que se pueda realizar la simulación. Si este porcentaje es rebasado, al intentar correr el programa aparecerán mensajes de error y no habrá ningún archivo de salidas. De igual manera, en DOE-2.1E el usuario puede indicar si desea que se impriman errores, advertencias y mensajes de precaución mediante la instrucción de **DIAGNOSTCS**, con las palabras clave **ERRORS**, **WARNINGS** y **CAUTION**, respectivamente.

En ambos programas es posible delimitar el nivel de error que se puede permitir en la simulación antes de llegar a un mensaje de error. En TRNSYS 13.1 se cuenta con la instrucción de **LIMITS**,

que permite al usuario establecer un cierto número de interacciones del programa antes de que aparezca la palabra de advertencia WARNING y un cierto número de advertencias antes de que aparezca la indicación de ERROR, mientras que en DOE-2.1E, ésta función la cumple la instrucción de ABORT.

A pesar de que los programas tienen la facultad de presentar breves mensajes referentes a los errores, estos muchas veces no son lo suficientemente claros como para identificar en qué consistió el error y puede llevar mucho tiempo al usuario localizarlo. Esta es una característica común en los dos programas que puede hacer su empleo un tanto tedioso.

Formatos de Presentación

En ambos programas es posible definir distintos formatos para la presentación de las salidas. Dentro de estos formatos están las opciones para reimprimir o no las entradas, imprimir valores por default, imprimir la información de las librerías utilizadas, presentar la información en forma de listados, etc. En TRNSYS 13.1 estas características se indican con las instrucciones WIDTH, NOLIST, LIST y MAP, y en DOE-2.1E con las instrucciones DEFAULT, COMMENTS, WIDE, NARROW, SINGLE-SPACED, DOUBLE-SPACED, ECHO, NO-ECHO, NO-LIMITS, LIMITS y LIBRARY CONTENTS. El orden en que estas instrucciones deben aparecer es diferente en los dos programas y como se puede ver, DOE-2.1E tiene más opciones para su presentación. Las características específicas de cada instrucción se muestran en las tablas 3.6.2 y 3.6.3 (para más detalle consultar los manuales de los programas).

Valores Constantes

Cuando se van a simular sistemas (en este caso edificios) con las mismas características pero con diferentes valores en las variables o en los valores iniciales de entradas, etc., es posible hacerlo sin necesidad de repetir toda la descripción del sistema. En TRNSYS 13.1 se usa la instrucción **CONSTANTS** para especificar palabras clave y sus valores respectivos que incluso pueden contener operaciones matemáticas y en DOE-2.1E se utiliza la instrucción **PARAMETER**, pero sólo acepta números constantes.

Funciones Matemáticas

En TRNSYS 13.1 es posible asignar diversas funciones matemáticas en las entradas en lugar de números mediante los estatutos **EQUATIONS**, **ACCELERATE**, **DFQ** y **NOCHECK**, con el propósito de permitir que las entradas puedan estar en función de las salidas de otras componentes, dándole mayor flexibilidad al programa principalmente por su característica modular. DOE-2 no presenta esta característica de la misma manera, pero tiene la opción de introducir algunas funciones de entrada o “valores funcionales” que el usuario requiera y no están incluidas dentro de las facultades del programa. Estas funciones pueden tener tres aplicaciones: 1) calcular variables que influyen en los resultados del programa, 2) calcular variables para determinar reportes, y 3) leer archivos de datos para usarlos en las simulaciones. Sin embargo, la aplicación de estas funciones demanda ciertos conocimientos de los cálculos internos del programa por parte del usuario así como de programación, por lo cual no se detallarán en este trabajo.

Comentarios

Otra de las características comunes en las entradas de los dos programas es su facultad para que el usuario incluya comentarios dentro de los archivos, para hacer más explícita la información introducida. Esto se hace colocando un símbolo al inicio de la línea donde se indica el comentario, que para TRNSYS 13.1 es un asterisco (*) y para DOE-2.1E un signo de dinero (\$). Una vez colocado dicho signo, los programas asumen que los datos que siguen dentro de esa línea son únicamente comentarios y no son tomados en cuenta para la simulación, pero sí pueden aparecer al presentar las salidas.

Fin de las Entradas

Para indicar que se ha introducido toda la información necesaria para la simulación, se debe indicar la instrucción END en los dos programas, si no aparece esta palabra, los programas asumirán que la información aún no está completa y no realizarán las corridas.

En DOE-2.1E la instrucción END debe aparecer al final de cada subprograma (LOADS, SYSTEMS, PLANT Y ECONOMICS) y una vez que se hayan incluido todos los subprogramas que se vayan a simular, se debe indicar la instrucción STOP, de lo contrario, nuevamente el programa asumirá que los datos están incompletos.

3.6.2 Estructura de las Entradas

En TRNSYS 13.1, la estructura de las entradas es diferente para el *deck* que para el subprograma BID, al igual que su presentación, por lo cual es conveniente analizarlas por separado, sin embargo, la estructura y presentación de las entradas de DOE-2.1E es muy similar a la de BID, haciendo posible su comparación.

Características del *Deck* (TRNSYS 13.1)

El *deck* de TRNSYS 13.1 está gobernado o dirigido, en primer término, por los estatutos de control de la simulación y por los estatutos de control de listados, como se ha explicado anteriormente y en segundo lugar, por los estatutos de control de las componentes, que son las que definen las características del sistema que va a ser simulado.

Aunque los estatutos de control de las componentes no tienen una estructura rígida, si deben tener cierto orden y asumir algunas reglas que hacen parecer al programa muy poco “amigable”. En términos generales, los estatutos de control de las componentes deben respetar la siguiente secuencia: UNIT-TYPE, PARAMETERS e INPUTS. Cada uno de estos estatutos se caracteriza por lo siguiente:

UNIT-TYPE. La descripción de cada componente empieza con un número de unidad y un número de TYPE. La unidad es el número que es reconocido por el programa para interrelacionarse con las demás componentes y no puede ser repetido, mientras que el TYPE, que es en sí la componente, si se puede repetir varias veces (excepto el TYPE 56), dependiendo de las necesidades del usuario y/o las características del sistema o edificio.

PARAMETERS. Cada componente del sistema requiere determinados parámetros que definen sus características, por ejemplo, diferentes modalidades de cálculo (como el TYPE 16 que permite 8 modalidades para calcular la incidencia de radiación solar), el tipo de información disponible, etc. El estatuto "PARAMETERS" debe indicarse después del de UNIT-TYPE y debe señalar el número de parámetros que van a determinar la componente, después de lo cual se indica el valor de cada uno de ellos.

INPUTS. Con este estatuto se describen las entradas de la componente. Estas entradas se deben describir en 2 líneas. Cuando las entradas están dadas de acuerdo a las salidas de otros TYPEs, se indican en la primera línea, y si son valores constantes, en la segunda.

De esa manera, la descripción de una componente, dentro de un TYPE puede quedar como en el siguiente ejemplo, donde se describe una aplicación del TYPE 16:

```
UNIT 4 TYPE 16 PROCESADOR DE RADIACIÓN
PARAMETERS 8
5 1 3 342 29.04 4921 5.58 1
INPUTS 14
1,6 1,4 1,5 1,19 1,20 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,2 90 180 90 -90 90 90 0 0
```

En este ejemplo, se indica que se simulará el TYPE 16, al cual se le ha asignado la unidad 4, que contiene 8 parámetros que para este caso son: el número de la modalidad (la modalidad 5 = la correlación de Reindl²⁷), el tipo de superficies que se simulará, la modalidad de las correlaciones para calcular la radiación sobre superficies inclinadas, el día en que empezará la simulación, la latitud del lugar, la constante solar, la diferencia entre la longitud del lugar y el meridiano de referencia y el sistema de unidades.

INPUTS 14 quiere decir que se describirán 14 entradas en las siguientes dos líneas, los primeros cinco valores de la primera línea indican que las entradas en este TYPE son las salidas 6, 4, 5, 19 y 20 de la UNIDAD 1, y por lo tanto, los primeros cinco valores de la línea de abajo se indican como 0, los siguientes valores son cantidades constantes, por lo que se indican sus valores en la segunda línea y en la primera se da el valor 0.

Todos los TYPEs que conforman un *deck*, deben estar definidos de esta manera (a excepción del TYPE 9 que por ser únicamente el lector de datos, sólo contiene parámetros), por lo que el usuario debe ser muy cuidadoso al introducir la información para no cometer equivocaciones, que derivarán en la obtención de errores, evitando que la simulación se lleve a cabo.

Como puede apreciarse, la presentación de un archivo de descripción (*deck*) de una simulación en TRNSYS 13.1 puede ser muy confusa si no se tiene a la mano el manual para tener la referencia de lo que significa cada valor, volviendo al programa un tanto complejo en este sentido, incluso cuando el usuario introduce anotaciones en el *deck* para hacer un poco más clara la descripción de los datos y su entendimiento.

La descripción de los demás TYPEs, incluyendo los referentes a edificaciones (TYPEs 12, 19 y 56) se hace de la misma manera, sólo que en el caso del TYPE 56 los parámetros y entradas de la componente (INPUTS) están definidas por los resultados del programa BID y pueden variar ampliamente.

3.6.3 Tipo de Información

La información requerida para las simulaciones depende del nivel de detalle con que estas se quieran llevar a cabo. Así, por ejemplo, TRNSYS 13.1 tendrá diferentes características de entradas para el TYPE 12 que para el TYPE 19 o el TYPE 56 y más aún para el programa BID.

Siguiendo con el criterio del análisis de la estructura de las entradas, en el caso de los TYPEs 12 y 19 es más conveniente hacer un análisis de sus entradas que una comparación, pues las características de cada uno de ellos difieren ampliamente. Sólo en el caso del TYPE 56 y más concretamente en el del subprograma BID, es posible hacer una comparación con las entradas de DOE-2.1E, lo cual se hará más adelante.

3.6.3.1 Análisis de las Entradas del TYPE 12 (TRNSYS 13.1)

El TYPE 12 es la modalidad más simplificada de TRNSYS 13.1. En general todas sus entradas están determinadas por los valores globales de los parámetros requeridos, por ejemplo, el valor de la capacitancia térmica total de la edificación, el valor global las ganancias internas, etc.

Las variables que requiere este TYPE están definidas por seis parámetros principalmente (tres más si se consideran equipos de aire acondicionado) y cuatro entradas (seis en caso de acondicionamiento de aire), las cuales requieren ser calculadas por el usuario antes de iniciar la descripción del TYPE. En las tablas 3.6.4 y 3.6.5 se muestran las características de cada una de estas variables, únicamente para casos donde no se requiere acondicionamiento de aire.

Como el usuario tiene que obtener por separado los valores globales de algunas variables (conductancia global y capacitancia térmica global) y los valores de todas las ganancias de calor que varían con el tiempo (ganancias internas por ocupación, iluminación, equipo, penetración solar, etc.) para darlos como una sola entrada, el tiempo de preparación de las entradas, en un principio, puede parecer demasiado, pero una vez determinados los valores requeridos, el introducirlos al archivo y correr el programa es un proceso muy rápido. Es de notarse que por utilizar valores globales, no es necesaria la descripción de orientaciones o dimensiones de las partes que componen el edificio, haciendo su manejo muy sencillo.

Una entrada que es común en las tres modalidades de simulación de edificios de TRNSYS 13.1, es la temperatura interior del edificio a partir de la cual se iniciarán las simulaciones. Este valor se puede indicar como la temperatura que se estima que prevalecerá en dicho espacio, aunque no sea la temperatura exacta. TRNSYS 13.1 empezará a estimar las ganancias o pérdidas de calor a partir de este valor, por lo que es necesario contemplar cierto tiempo después de la hora de inicio para considerar válidas las predicciones del programa (en el análisis de sensibilidad de TRNSYS 13.1 se calculó este tiempo de “acoplamiento”, ver cap. 5.3).

PARÁMETROS	ENTRADAS
1. Modo de operación que tendrá la simulación (hay cuatro opciones, si se quiere simular o no equipos de calefacción y aire acondicionado). 2. Conductancia global para la casa 3. Capacitancia térmica total de la casa. 4. Temperatura interior con la cual inicia la simulación 5. Calor específico del aire. 6. Producto de la emitancia por la capacitancia del intercambiador	1. Temperatura del aire de exterior (o en su caso, del aire acondicionado). 2. Cantidad de masa de aire que penetra 3. Temperatura ambiente 4. Ganancias de calor dependientes de tiempo

Tabla 3.6.4 Parámetros y Entradas del TYPE 12.

3.6.3.2 Análisis de las Entradas del TYPE 19 (TRNSYS 13.1)

Se puede decir que el TYPE 19 es una modalidad detallada con la única limitante que sólo puede simular un espacio, sin embargo, el detalle con que se lleva a cabo la simulación en este caso, requiere de entradas más específicas que el TYPE 12, mismas que en algunos casos pueden parecer complicadas, dependiendo de las características del espacio.

Para describir una zona en esta modalidad, el usuario debe indicar por separado los parámetros y entradas del espacio interno, de los muros, de ventanas, de puertas, etc. Aquí es posible seleccionar elementos predefinidos como techos, muros exteriores y divisiones interiores por medio de los números de código indicados en las tablas de *coeficientes de función de transferencia* de la ASHRAE (Handbook of Fundamentals 1977²² o 1981¹⁸).

Las funciones de transferencia correspondientes a estos datos están en el archivo ASHRAE.COF, que es accesado por el programa al principio de la simulación. En caso de que las características del edificio no coincidan con los parámetros de la ASHRAE, se puede hacer una aproximación a éstas o se pueden introducir de manera independiente.

Si el usuario considera, dentro de su edificio, un elemento (llámese techo, muro, etc.) construido arbitrariamente, los coeficientes de las funciones de transferencia se pueden generar con el sub-programa PREP, incluido en TRNSYS 13.1, e indicarlos como entradas en el TYPE19.

Para describir esta componente, los parámetros y entradas pueden aparecer como una lista sencilla o pueden ser presentadas en listas separadas, cada una con su lista individual de parámetros y entradas. Los tipos de listas que se pueden presentar son:

1. Parámetros y entradas de ZONA
2. Parámetros y entradas de MUROS (incluye techos y pisos)
3. Parámetros y entradas de VENTANAS

La lista de parámetros y entradas de ZONA es la que debe aparecer en primer lugar. Una zona puede estar configurada hasta por 15 superficies, incluyendo ventanas y puertas, pero las características de estas superficies no se describen aquí, sino en los listados de muros y ventanas. En el listado de la ZONA, se especifican únicamente las generalidades del espacio interno y las condiciones externas. Los parámetros y entradas requeridas en este caso se presentan en la tabla 3.6.5.

PARÁMETROS	ENTRADAS
1. Modo de operación	1. Temperatura ambiental
2. Unidades de operación(SI o Unidades Inglesas)	2. Humedad absoluta ambiental
3. Volumen de aire del espacio (m ³)	3. Temperatura del flujo de ventilación
4. Cambios de aire constante por hora	4. Cantidad de masa del flujo de ventilación (Kg/hr)
5. Proporción constante de los cambios de aire debido a diferencias de temperatura entre el interior y el exterior	5. Humedad absoluta del flujo de ventilación
6. Proporción constante de los cambios de aire debido a los efectos de viento	6. Ganancia de humedad (que no sea gente)
7. Capacitancia del aire del cuarto y mobiliario	7. Número de personas en la zona
8. Número total de superficies que conforman el cuarto ($1 \leq N \leq 15$)	8. Nivel de actividad de la gente
9. Temperatura inicial del cuarto	9. Entrada de energía radiante debido a iluminación, equipamiento, etc.
10 Humedad absoluta inicial del cuarto	10. Suma total de otras ganancias de calor instantáneas en el espacio
	11. Velocidad de viento

Tabla 3.6.5 Parámetros y Entradas requeridas por el TYPE 19 para la descripción de la ZONA.

La segunda lista (parámetros y entradas de MUROS, incluyendo techos y pisos) define las características constructivas del espacio. Es posible incluir hasta 15 superficies, para cada una de las cuales es necesario determinar sus parámetros y entradas. Dentro de estas superficies se consideran los muros exteriores, las divisiones interiores y los muros separando zonas a diferentes temperaturas así como techos, pisos y plafones.

La descripción de las características constructivas de los muros se puede hacer de varias maneras:

- a) Utilizando los coeficientes de transferencia de elementos predefinidos por la ASHRAE
- b) Introduciendo los valores de los coeficientes de funciones de transferencia para elementos arbitrarios, directamente como entradas, y
- c) indicando la proporción de la transferencia de calor total hacia la superficie interior del muro.

a) Uso de elementos predefinidos por la ASHRAE.

TRNSYS 13.1 cuenta con un archivo que contiene los coeficientes para muros estándar, divisiones, plafones o pisos dados en el ASHRAE Handbook of Fundamentals^{18,22}. Estos coeficientes pueden ser accesados por el usuario asignando al principio de la simulación el archivo ASHRAE.COF.

Al usar los coeficientes del ASHRAE, los parámetros se definen de acuerdo al número de superficie que corresponda (de 1 a 15) y al tipo de muro que se refiera (división interior, muro exterior o muro separando dos zonas). En la tabla 3.6.6 se describen los parámetros y las entradas usando los coeficientes del ASHRAE.

PARÁMETROS	ENTRADAS
1. Número de superficie 2. Tipo de superficie (Muro exterior, división interior, muro separando zonas) 3. área 4. reflectancia de la superficie interior 5. Absortancia de la superficie exterior 6. Muro correspondiente a las alas de la ASHRAE	MUROS EXTERIORES: 1. Radiación incidente sobre la superficie exterior
	MUROS SEPARANDO ZONAS: 1. Temperatura equivalente asociada con la zona adyacente 2. Temperatura de la zona adyacente 3. Conductancia adicional asociada con la transferencia de calor entre las zonas

Tabla 3.6.6 Parámetros y entradas del TYPE 19 para describir los MUROS, usando los elementos predefinidos de la ASHRAE^{18,22}.

b) Uso de elementos constituidos arbitrariamente

Si el usuario utiliza muros o superficies construidas arbitrariamente, puede generar el mismo tipo de coeficientes de la ASHRAE con el sub-programa PREP, en cuyo caso es necesario contar con las siguientes características de cada uno de los materiales empleados:

1. Espesor
2. Conductividad
3. Densidad
4. Calor específico
5. Resistencia (En caso de contemplar espacios de aire)

Al utilizar el programa PREP, se genera una lista que contiene todos los valores de coeficientes b, c y d, así como el valor-U del elemento calculado. Cuando se hace la descripción de esta manera, los parámetros son prácticamente los mismos que cuando se usan los elementos predefinidos por el ASHRAE, sólo que en el lugar del parámetro 6 se deben indicar cada uno de los coeficientes que componen el elemento, de tal manera que si el espacio cuenta con muchas superficies, la cantidad

de parámetros puede llegar a ser muy numerosa y por consiguiente la facilidad para cometer errores en las entradas se incrementa.

Cabe mencionar que el subprograma PREP no es un pre-procesador de datos específicamente para el TYPE 19, sino un programa que puede ser utilizado de manera independiente para generar los coeficientes de transferencia de calor b, c y d, en base al programa de funciones de transferencia de Mitalas y Arsenault²⁸.

c). Uso de la transferencia de calor total

El tercer modo para introducir las características constructivas de los materiales es indicando la proporción de la transferencia de calor total hacia la superficie interior del muro. En éste caso sólo se requieren 5 parámetros, los primeros 4 son los mismos que en los casos anteriores y el quinto es el coeficiente de convección interior.

La única entrada en esta modalidad es la transferencia de energía del interior de la zona hacia la superficie interior del muro²¹.

El tercer listado corresponde a la descripción de las ventanas. Además de las propiedades de las ventanas, el usuario debe especificar también ciertas características de la iluminación de las superficies interiores debido a la penetración de la radiación solar directa, las cuales se indican en la tabla 3.6.7.

PARÁMETROS	ENTRADAS
1. Número de superficie 2. Tipo de superficie 3. Área 4. Modo de la ventana (Modo 1 = la energía térmica y solar transmitida es calculada internamente y Modo 2 = la energía térmica y solar transmitida es proporcionada como una entrada). 5. Transmitancia de la radiación solar difusa 6. Coeficiente de convección interior 7. Número de superficies interiores sobre las cuales incide la radiación directa transmitida 8. Primer superficie sobre la cual incide la radiación solar directa transmitida 9. Segunda superficie sobre la cual incide la radiación solar directa transmitida...	MODO 1. 1. Radiación incidente total 2. Radiación directa incidente 3. Transmitancia global para la radiación solar. 4. Coeficiente de transferencia de la ventana (valor-U) 5. Fracción de la radiación que penetra que incide sobre la primer superficie 6. Fracción de la radiación que penetra que incide sobre la segunda superficie... MODO 2. 1. Radiación solar total que pasa a través de la ventana 2. Radiación directa que pasa a través de la ventana 3. Ganancia de energía térmica a través de la ventana 4. Fracción de la radiación que penetra que incide sobre la primer superficie 5. Fracción de la radiación que penetra que incide sobre la segunda superficie...

Tabla 3.6.7 Parámetros y Entradas para la descripción de ventanas en el TYPE 19.

Una característica que se observa en la descripción de las ventanas es que el usuario debe indicar sobre cuantas superficies interiores incide la radiación solar que penetra y el orden en que incide sobre ellas (parámetros 7,8,9,...), por lo que es necesario que el usuario tenga un buen conocimiento de la trayectoria solar para el lugar y fecha que se está simulando, de lo contrario podrá introducir información incongruente para el cálculo térmico del espacio (éstos datos los utiliza el programa para calcular la proporción de energía almacenada por cada uno de los elementos que reciben la radiación solar).

Los datos de radiación que se requieren para indicarlos en las entradas pueden ser proporcionados por el TYPE 16.

El último aspecto que hay que definir en el TYPE 19 es la disposición de las superficies que conforman el espacio, así como la ubicación de las ventanas y/o puertas dentro de ellas. La descripción de estos elementos se utiliza para los cálculos de intercambio de radiación entre ellos y no son requeridos valores de entradas, sino solamente los parámetros.

Existen tres modos diferentes para describir la geometría de un espacio:

Modo 1. El programa calcula factores de vista para la geometría de un paralelepípedo (una caja). Se deben especificar parámetros que definen el tamaño de la zona y la ubicación relativa de las superficies de acuerdo a la disposición de la figura 3.6.1. Para cada ventana o puerta se deben incluir parámetros y entradas adicionales que indican su posición dentro del muro (ver tabla 3.6.8 y figura 3.6.2).

Modo 2. El usuario especifica el número de entradas requerido, es decir, indica directamente el factor de vista entre cada superficie con las demás.

Modo 3. el modo de geometría se define como 0. En este caso el programa usa proporciones de área para determinar los factores de vista, aunque de acuerdo al programa este no es un procedimiento adecuado, puede ser conveniente cuando las superficies interiores son cercanas en temperatura y el intercambio de energía infrarroja no es significativo. Cuando se especifica este modo no se requieren más parámetros.

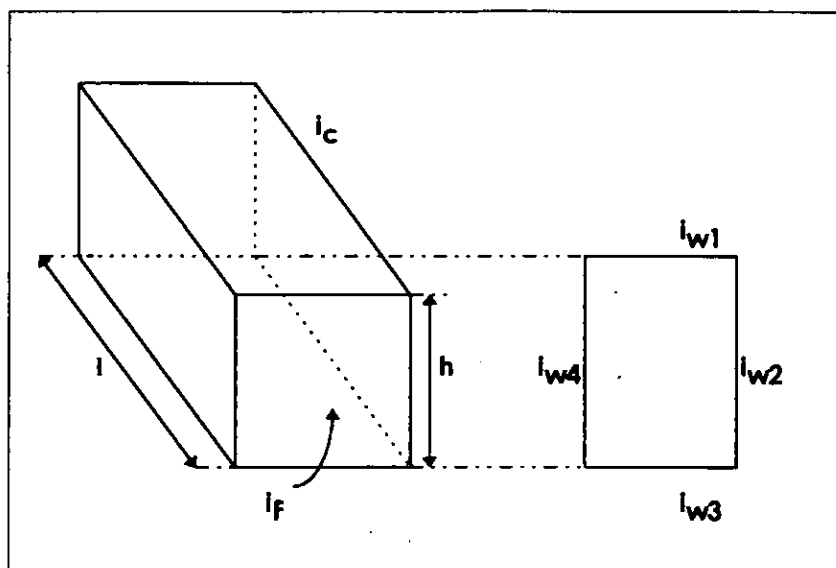


Figura 3.6.1. Modo de Geometría 1 = Paralelepípedo Rectangular (TYPE 19).

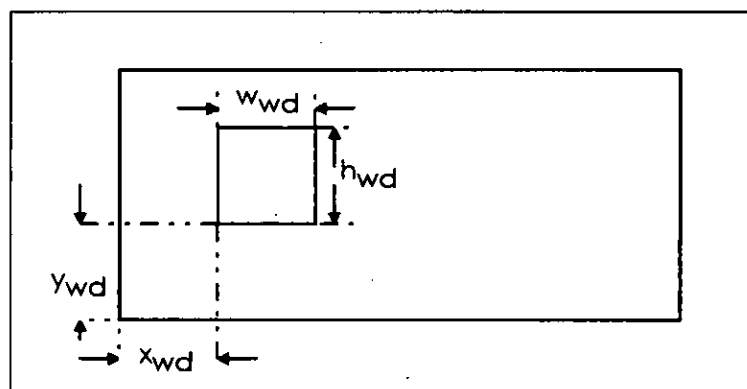


Figura 3.6.2. Ubicación de puertas y ventanas para el Modo de Geometría 1 (TYPE 19).

GEOMETRÍA DEL ESPACIO	GEOMETRÍA DE PUERTAS Y VENTANAS
1. Modo de la geometría	1. Número de la superficie asociada con la ventana o puerta
2. Altura de muros	2. Superficie sobre la cual se ubica la ventana o puerta
3. Ancho de la envolvente	3. Distancia x_{wd}
4. Profundidad de la envolvente	4. Distancia y_{wd}
5. Número de la superficie i_{w1} indicada en la fig. 3.19.1	5. Altura de la ventana (h_{wd})
6. Número de la superficie i_{w2} indicada en la fig. 3.19.1	6. Ancho de la ventana (w_{wd})
7. Número de la superficie i_{w3} indicada en la fig. 3.19.1	
8. Número de la superficie i_{w4} indicada en la fig. 3.19.1	
9. Número de la superficie asociada con el piso	
10. Número de la superficie asociada con el techo	
11. Número de ventanas o puertas sobre las superficies.	

Tabla 3.6.8 Datos para especificar la geometría del Espacio, de Puertas y de Ventanas (en relación a las figuras 3.6.1 y 3.6.2).

3.6.4 BID (Building Input Description) y LOADS

La única modalidad de TRNSYS 13.1 que puede ser comparada con DOE-2.1E es el TYPE 56, que trabaja paralelamente con el subprograma BID (Building Input Description), donde se hace la descripción del edificio. De manera general, estos dos programas tienen las siguientes características:

BID. BID es un pre-procesador del TYPE 56 cuya función es generar 3 tipos de archivos, dos de los cuales van a ser usados como los parámetros del TYPE 56 y el otro determina las entradas y salidas requeridas por el usuario, es decir, que la simulación del edificio no se lleva a cabo con el programa BID, sino al igual que en los casos anteriores, se realiza con el *deck* que contiene la descripción del TYPE 56. No obstante, toda la descripción del edificio se hace en el programa BID.

Los dos archivos generados por BID que van a ser usados como los parámetros del TYPE 56, contienen la descripción del edificio y las funciones de transferencia utilizadas para la simulación. Estos dos archivos son accedidos en el *deck*, a través de las unidades lógicas de FORTRAN 10 y 11, al principio de la simulación. Las entradas del TYPE 56 son indicadas por el otro archivo generado por BID y varían de acuerdo a las características del edificio y los requerimientos del usuario.

La descripción del edificio se hace mediante bloques, los cuales pueden ser empleados para describir la construcción del edificio, ya sea por sí mismos o utilizando otros subcomandos. BID está estructurado en cuatro grupos de datos ordenados como sigue: **PROPERTIES**, **TYPES**, **BUILDING** Y **OUTPUT**. **PROPERTIES** representa los propiedades generales del edificio y

OUTPUT define el nivel de salidas tanto de **BID** como del **TYPE 56**. **TYPES** y **BUILDING** son los grupos donde se describe el edificio.

Cada grupo contiene cierto número de palabras clave (keywords) que son reconocidas por el programa con las cuales se indican los datos del edificio. Algunas veces estas palabras clave deben tener un orden específico, otras no. Si existen errores en la descripción del edificio, al correr el programa **BID** aparecerán indicados y no se podrán generar los archivos para el **TYPE 56**.

LOADS. En DOE-2.1E, el programa de **LOADS** si es el que lleva a cabo la simulación. Este programa calcula las cargas de calentamiento y enfriamiento para cada espacio dentro del edificio, asumiendo que no hay equipos de aire acondicionado o calentamiento en operación y que cada espacio permanece a una temperatura constante individual. De esta manera, el cálculo horario de las cargas en el programa de **LOADS**, es la energía requerida para mantener la temperatura del espacio sin los efectos de la ventilación y por lo tanto, todas las salidas producidas por este programa estarán dadas como la carga de enfriamiento o calentamiento que servirán de entradas al programa de **SYSTEMS** para calcular el dimensionamiento del equipamiento (en caso de haberlo) y producir a su vez sus propias salidas. Una discusión acerca del tipo de salidas producidas por estos programas se presenta en el capítulo 3.7.

Antes de llevar a cabo la simulación de **LOADS**, el archivo debe ser procesado con el programa **BDL**. En caso de existir errores en la descripción, **BDL** indicará donde se encuentran y el archivo no podrá ser simulado hasta haber sido corregido.

Las Entradas

En primer término, las entradas de los dos programas están delimitadas por las instrucciones y palabras clave que se han indicado anteriormente (Cap. 3.6.1) y en segundo lugar, contienen otra serie de instrucciones y subcomandos que especifican las condiciones internas y externas de los espacios, las características constructivas del edificio y la disposición geométrica de cada uno de sus elementos.

El orden que siguen las entradas en los programas no es precisamente el que se sigue en este estudio, ya que en ambos programas es diferente, por tal razón, aquí se han clasificado de acuerdo al tipo de datos que manejan, a saber:

- a). Características y Propiedades constructivas,
- b). Descripción de la geometría del edificio, y
- c). Condiciones internas y externas de los espacios.

a). Características y propiedades constructivas

Dentro de las características constructivas se comprende la composición de muros, losas y pisos en base a las propiedades termofísicas de los materiales de construcción, así como las propiedades térmicas y ópticas de ventanas.

Una característica común en los dos programas es que los techos y pisos exteriores son tratados como "muros". En el programa BID sólo se permite un tipo de descripción para indicar las

características constructivas de estos muros, que es mediante la descripción de cada uno de los materiales que los componen incluyendo las propiedades térmicas y físicas de cada material, mientras que en LOADS, esta descripción es mucho más flexible, pues se puede hacer de 5 maneras diferentes (ver tabla 3.6.9).

DOE-2.1E	TRNSYS 13.1
1. Especificar cada material de manera individual (por espesor, conductividad, densidad y calor específico o resistencia). 2. Especificar un valor numérico para el valor-U 3. Especificando una palabra clave de la tipología de ASHRAE para las palabras clave de LAYERS, 4. Especificar una lista de códigos de la tipología de ASHRAE para la palabra clave MATERIAL 5. Especificar una lista de códigos de DOE-2.1E (de la librería propia del programa) 6. El usuario puede agregar materiales, capas y construcciones dentro de la librerías de DOE-2.1E para simulaciones posteriores.	1. Especificar cada material de manera individual (por espesor, conductividad, densidad y calor específico o resistencia)

Tabla 3.6.9. Diferentes maneras de especificar un muro exterior en DOE-2.1E y TRNSYS 13.1.

En el caso de DOE-2.1E, cuando se indica el valor-U del muro, éste es tratado como un elemento en estado estable o instantáneo para el cálculo de transferencia de calor. En todos los demás casos se consideran muros dinámicos.

MATERIALES. Cada material que forma parte de un muro es tratado como una “capa” del muro.

En ambos programas la descripción de estas capas se hace de la misma manera, aunque con códigos diferentes. Las capas pueden o no tener masa, en el primer caso es necesario especificar las siguientes propiedades:

- espesor de la capa
- conductividad térmica del material

- calor específico del material
- densidad del material

Cuando un muro contiene una capa de aire en su interior, ésta también es tratada como una capa pero sin masa, debiéndose indicar en éste caso únicamente el valor de la resistencia térmica.

MUROS. La descripción de los muros en los dos programas se hace indicando la secuencia de las capas que los componen, pero además es necesario indicar características propias de cada uno, las cuales son diferentes en los dos programas (ver fig. 3.6.10).

VENTANAS. El tratamiento de las ventanas también es diferente entre TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E. Al igual que en la descripción de los muros, DOE-2.1E puede acceder librerías que contienen las propiedades térmicas y ópticas de diferentes tipos de vidrio mediante el uso de palabras clave, mientras que en TRNSYS 13.1 es necesario indicar el valor de cada una de ellas.

TRNSYS 13.1	DOE-2.1E
1. Nombres de las capas previamente definidas que conforman al muro 2. Coeficiente de transferencia de calor por convección superficial al interior 3. Coeficiente de transferencia de calor por convección superficial al exterior. 4. Absortancia superficial interior del muro 5. Absortancia superficial exterior del muro	1. secuencia de las capas que conforman el muro 2. Resistencia convectiva y radiante de la película de aire superficial interior. La resistencia exterior es calculada por el programa. En muros interiores es doble. 3. Rugosidad relativa del acabado de la superficie exterior. Se indica con un valor código de acuerdo a la tablas de DOE-2.1E (el coeficiente de convección exterior es calculado por el programa en función de la rugosidad del muro y la velocidad del viento). 4. Absortancia del muro a la radiación solar (se indica solo para muros exteriores)

Tabla 3.6.10. Datos para describir las características de los muros en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.

Para calcular la ganancia de calor solar a través de las ventanas, en DOE-2.1E se puede hacer de dos maneras: usando un valor de código para el tipo de vidrio (GLASS-TYPE-CODE), que implica las propiedades de los vidrios de acuerdo a tablas presentadas en los manuales de DOE-2.1E, o usando un coeficiente de sombreado (SHADING-COEF), con el cual, el cálculo de la ganancia solar se lleva a cabo usando la técnica de coeficientes de sombreado de la ASHRAE.

En la tabla 3.6.11 se presenta un resumen de la comparación de los datos de entrada para las ventanas en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.

TRNSYS 13.1	DOE-2.1E
UGLASS= coeficiente de transferencia de calor de la superficie interior de la ventana a la superficie exterior. HINSIDE= coeficiente de transferencia de calor convectivo de la superficie interior de la ventana HOUTSIDE= coeficiente de transferencia de calor incluyendo convección y radiación al exterior ABSORPTANCE= absorptancia global de la ventana para la radiación solar incidente REFLECTANCE = Reflectancia global de la ventana para la radiación solar difusa exterior.	PANES = es el número de paneles de vidrio que contiene la ventana 1. GLASS-TYPE-CODE= número de código que identifica el tipo de vidrio usado en la ventana. 2. SHADING-COEF= Valor entre 0.0 y 1.0 como lo especifica la ASHRAE ¹⁵ . GLASS-CONDUCTANCE= la conductancia total de la ventana exceptuando el coeficiente de convección exterior.

Tabla 3.6.11 datos de entrada para las ventanas en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.

Cuando en DOE-2.1E no se especifica el valor, el programa toma un valor por default dependiendo del numero de paneles de vidrio de la ventana. El valor de la conductancia total se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{GLASS-CONDUCTANCE} = (1/U - R_{\text{film}})^{-1} \quad (3.6.4.1)$$

donde:

U = conductancia global

R_{film} = resistencia de la capa de aire exterior que se calcula por

$$R_{\text{film}} = 1/[(0.001661 \cdot V^2) + (0.302 \cdot V) + 1.45)] \quad (3.6.4.2)$$

donde V es la velocidad del viento.

En el caso de TRNSYS 13.1, la transmitancia no se indica en esta parte, sino al describir las características del espacio, pues se considera que la transmitancia de radiación solar de la ventana depende fuertemente de su orientación, de tal manera que el usuario debe introducir este valor de acuerdo a su criterio.

Como puede verse, en esta parte DOE-2.1E toma más en cuenta las condiciones ambientales que TRNSYS 13.1, pudiendo hacer una diferencia importante en el cálculo de las ganancias por radiación solar a través de las ventanas, además cuenta con unas librerías que contienen una gran variedad de propiedades térmicas y ópticas de las ventanas comerciales en los Estados Unidos, que aunque no son las mismas para las ventanas mexicanas, si pueden determinar parámetros de sus valores de acuerdo al tipo de vidrio con algún grado de aproximación.

b). Descripción de la geometría del edificio

En la descripción de la geometría del edificio es posiblemente donde más se diferencian las entradas de TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E y puede ser incluso una característica de peso en su elección para la simulación de los edificios.

En BID, la descripción de la disposición de los elementos que conforman el edificio (si no se consideran elementos que produzcan sombras sobre el mismo edificio) es muy sencilla, únicamente es necesario indicar todas las orientaciones posibles para los muros exteriores y ventanas. El único dato necesario, en este caso, son los nombres que se asignarán a cada orientación, por cada una de las cuales será requerida una entrada de radiación solar para el TYPE 56, que generalmente es suministrada por el TYPE 16.

Si se da el caso que existan elementos que produzcan sombras, como aleros, parteluces, etc., es necesario incorporar otro TYPE al deck de la simulación, que correspondería al TYPE 34, el cual puede ser introducido varias veces y cuya descripción no se hace en BID, sino en el mismo deck. Esta característica se discute más adelante.

En DOE-2.1E, la descripción de la geometría del edificio es un tanto laboriosa, pues independientemente de si existen o no elementos que produzcan sombras al edificio, cada elemento (muro, puerta o ventana) se debe describir de acuerdo a ciertos sistemas de coordenadas. Son tres los sistemas cartesianos de coordenadas que utiliza el programa LOADS para describir el edificio:

1. Sistema de coordenadas del edificio,
2. Sistema de coordenadas del espacio y
3. Sistema de coordenadas de superficie.

Estos sistemas están relacionados entre sí por simples rotaciones y traslaciones. La ubicación del sistema de coordenadas de los espacios es relativa al origen del sistema de coordenadas del edificio, y el sistema de coordenadas de las superficies es relativo al sistema de coordenadas del espacio.

El sistema de coordenadas del edificio se define con la instrucción **BUILDING-LOCATION** y se le deben asignar los valores de **ACIMUT**, **LATITUD**, **LONGITUD** y **ALTITUD**. La ubicación del sistema de coordenadas del espacio se hace dentro del sistema de coordenadas del edificio, asignándole los valores de las palabras clave **X**, **Y**, **Z** y **ACIMUT** en la instrucción del espacio (**SPACE**) conforme se muestra en la figura 3.6.3. Para indicar la localización de un muro o techo, también se hace con respecto al sistema de coordenadas del espacio, asignando los valores de **X**, **Y**, **Z**, **ACIMUT** e **INCLINACIÓN**. La ubicación de las ventanas es a su vez relativa al sistema de coordenadas de las superficies asignándoles los valores de **X**, **Y** y **SETBACK** en la instrucción de **WINDOW** (ver figura 3.6.3).

Para describir la ubicación de los elementos, en DOE-2.1E se debe seguir la siguiente jerarquía:

1. **SPACE** (espacio)
2. **EXTERIOR-WALL** (Muro exterior) o **EXTERIOR-ROOF** (Techo)
3. **WINDOW** (ventana) o **DOOR**(puerta)

Otro dato que solicita DOE-2.1E para la ubicación de un edificio es el número de la zona horaria. El rango de valores va de -1 a -12 para zonas al este del primer meridiano y de 1 a 12 para zonas al oeste del primer meridiano. Si no se indica este valor el programa asumirá por default el valor cero,

que corresponde al meridiano de Greenwich y se podrán generar errores como el que el efecto solar ocurra durante la noche.

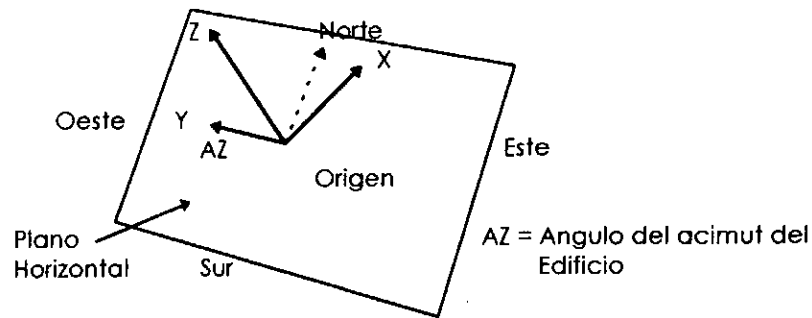
c). Condiciones internas de los espacios.

Las condiciones de los espacios están determinadas por las ganancias internas de calor debido a iluminación, equipamiento, personas, infiltración, etc. Tanto en TRNSYS 13.1 como en DOE-2.1E, los valores de las ganancias se dan en función de su valor máximo, pues pueden tener variaciones con el tiempo y pueden o no proporcionar el 100% de calor al espacio. De esta manera, son cuatro las características que se pueden definir en esta sección:

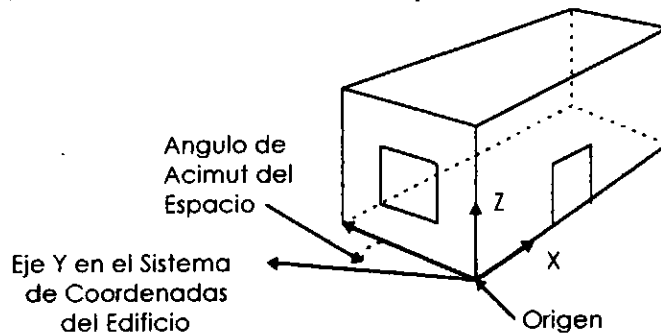
1. Fuente de las ganancias,
2. Tipo de calor de la ganancia.
3. Cantidad de calor de la ganancia, e
4. Itinerarios de las ganancias

En TRNSYS 13.1, las características de las ganancias son las mismas para cualquier tipo de fuente, pero en DOE-2.1E presentan algunas diferencias.

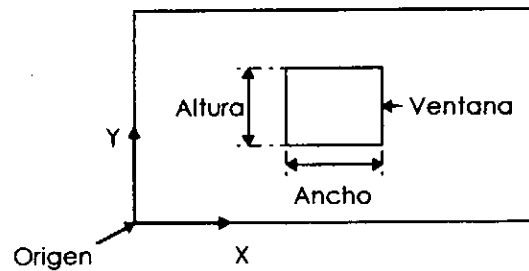
1. Sistema de Coordenadas del Edificio.



2. Sistema de Coordenadas del Espacio



3. Sistema de Coordenadas de las Superficies



Setback es el plano Normal a X-Y.

Fig. 3.6.3 Sistemas de coordenadas para la descripción geométrica del edificio en DOE-2.1E.

Tipo de fuente de las ganancias.

En los dos programas se pueden especificar las fuentes de las ganancias de calor que pueden tener los espacios, las cuales se pueden clasificar en: gente, iluminación, equipamiento e infiltración. TRNSYS 13.1 además tiene la opción de considerar la ventilación, pero en DOE-2.1E no es posible, pues se considera al espacio herméticamente cerrado y el único intercambio de aire con el exterior es debido a la infiltración.

Tipo de calor de la ganancia

Cuando se hace un cálculo o dimensionamiento de un equipo de aire acondicionado, es necesario especificar el tipo de calor que se está removiendo, que puede ser sensible o latente. Cuando se trata de calor sensible, se considera que éste afecta directamente a la carga de energía del equipo de acondicionamiento, mientras que en el caso del calor latente se considera únicamente el incremento de humedad en el aire y no afecta directamente la carga de energía del equipo.

Aunque ésta característica se debe indicar en los dos programas, se hace de manera diferente, siendo más importante para DOE-2.1E por estar enfocado principalmente al dimensionamiento de equipos de calefacción y enfriamiento de aire. De esta manera, los datos requeridos por los programas son prácticamente los mismos pero su indicación presenta diferencias, como se muestra en la tabla 3.6.12.

TRNSYS 13.1	DOE-2.1E
Cantidad total de la ganancia	Cantidad total de la ganancia
Proporción de energía convectiva	Proporción de calor latente
Proporción de energía radiante	Proporción de calor sensible
Ganancia de humedad	

Tabla 3.6.12. Tipos de ganancias de calor en el espacio en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.

Cantidad de calor de la ganancia

Las ganancias de calor se indican de acuerdo a su valor máximo en ambos programas, pudiendo ser escaladas en base a itinerarios que pueden ser diarios, semanales, mensuales o anuales.

Itinerarios de las ganancias

Los horarios o itinerarios son funciones periódicas cuyas salidas pueden variar de acuerdo a la hora del día y/o semana durante todo el año. Se usan para determinar horarios de uso, itinerarios de encendido y apagado de iluminación, de equipamiento, etc.

En TRNSYS 13.1 sólo se pueden especificar dos formas de itinerarios, en función de la hora del día y en función del día de la semana, mientras que en DOE-2.1E es posible también indicarlos en función de los días del año.

Para especificar los itinerarios en TRNSYS 13.1, se indica primero en función de la hora del día, indicando primero la hora del día a la cual cambia el itinerario (hasta 24) y después los valores del itinerario correspondientes a las horas dadas. Si se quiere definir un itinerario para toda la semana, se indica el día de la semana en la que el itinerario cambia y después el nombre de los itinerarios horarios definidos anteriormente correspondientes a los días dados.

Si se quieren indicar estos itinerarios a lo largo del año, el programa considerará que los itinerarios semanales se repetirán una y otra vez durante el tiempo de la simulación, siendo los días de la semana relativos al primer día de la simulación.

En DOE-2.1E, para definir un determinado itinerario a lo largo de un año, se puede hacer en tres pasos. Primero, utilizando uno o más itinerarios de 24 hrs., en segundo lugar, estos horarios de 24 horas se le asignan a diversos días de la semana y finalmente, uno o más itinerarios semanales son asignados a determinados periodos del año.

DOE-2.1E tiene además la facultad de asignar distintas características a determinados días en el transcurso del año, por ejemplo, con la instrucción DAYLIGHT-SAVINGS, se indica que un día de 23 horas ocurre en la primavera y que un día de 25 hrs. sucede en el otoño. El usuario debe indicar esta palabra clave seguida de la palabra YES o NO, para afirmar o anular respectivamente este comando.

Otra característica para modificar las características de los itinerarios en determinados días del año es mediante el uso de la instrucción HOLIDAY. Con este comando el programa puede calcular las cargas para días festivos usando horarios diferentes de los establecidos para las semanas. Esta palabra debe ir seguida de la palabra YES o NO para indicar que se utilizarán o no, respectivamente, los días festivos (DOE-2.1E tiene dentro de los datos de sus librerías las fechas festivas para los Estados Unidos).

Tipos de Ganancias

Ganancias por Gente

Las ganancias de calor por la ocupación de personas están determinadas por:

1. El número de personas dentro del espacio
2. La cantidad de calor generado(de acuerdo a las actividades)

3. El tipo de calor generado (sensible o latente en DOE-2.1E, y proporción de calor convectivo, radiante y humedad en TRNSYS 13.1), y
4. Los itinerarios de uso a lo largo del día, semana o año.

Estas características son comunes para los dos programas.

Ganancias por Iluminación

Mientras que en TRNSYS 13.1 las ganancias de iluminación se determinan únicamente por los parámetros ya mencionados, en DOE-2.1E existen varias maneras de definir las:

1. En primer lugar se deben indicar los horarios de la iluminación, de la misma manera que los demás tipos de ganancias.
2. La cantidad de calor generado por la iluminación se puede indicar de dos maneras: en función de la máxima cantidad de energía requerida para mantener en operación la iluminación, o en función de la cantidad de energía requerida para la iluminación por unidad de área (m^2 o ft^2).
3. Aunque en el caso de la iluminación se considera que todo el calor es sensible, si las lámparas se consideran colocadas dentro de un plafón, parte del calor generado por ellas se pierde dentro de este plafón o por ductos de ventilación. En DOE-2.1E el usuario tiene la posibilidad de indicar el porcentaje de calor que entra al espacio considerando que una parte del total del calor se ha perdido en el plafón.

4. En DOE-2.1E es posible, además, indicar el tipo de iluminación que se está manejando, en base a la cual el programa asigna el porcentaje de la energía total que es introducida al espacio como calor. Estos tipos de iluminación pueden ser:

- Lámparas fluorescentes suspendidas
- Lámparas fluorescentes empotradas - no ventiladas
- Lámparas fluorescentes empotradas con ventilación hacia el falso plafón
- Lámparas fluorescentes empotradas con ventilación por suministro y hacia el falso plafón
- Lámparas incandescentes

5. Otra opción de DOE-2.1E es la de indicar otro tipo de iluminación, menos importante (por ejemplo, lámparas de buró, etc.) a la cual se le pueden asignar características propias de itinerarios y cantidad de calor.

En TRNSYS 13.1 también se puede indicar otro tipo de iluminación, solamente asignándole otro nombre, no precisamente el de iluminación.

Ganancias por Equipamiento.

En el caso del equipamiento se siguen los mismos requerimientos que para personas, únicamente es necesario indicar los itinerarios en que estará en operación, la cantidad de calor que será generada, ya sea en función de la carga total de energía o en función de la carga por unidad de área y el tipo de calor generado (sensible o latente).

En éste caso TRNSYS 13.1 tiene una ventaja, pues como no es necesario indicar ésta ganancia como equipamiento, se pueden definir distintos tipos de equipamiento, con diferentes características de itinerarios, cargas de energía y tipos de calor, a diferencia de DOE-2.1E, que sólo permite la asignación de un tipo de equipamiento, por lo que en caso de existir aparatos o equipo con distintas características, se deberán asignar los valores totales como un solo equipamiento.

Infiltración

La infiltración se lleva a cabo con las condiciones del aire exterior y es manejada por los dos programas de manera diferente.

En TRNSYS 13.1 la infiltración se indica en función del número de cambios de aire del espacio en un lapso de una hora, así, la infiltración de una zona está definida por el producto de los cambios de aire, el volumen de la zona y la densidad del aire. La desventaja de éste método es que la infiltración se supone constante durante el itinerario que se le asigne, lo cual no sucede en la realidad, además de que es muy difícil estimar el número de cambios de aire que pueden suceder en una hora, quedando únicamente a criterio del usuario.

DOE-2.1E, por su parte, tiene varios métodos para considerar la infiltración y cada uno de ellos puede presentar variantes. Los métodos que se pueden emplear en este caso son:

1. Método de Cambios de Aire
2. Método de "CRACK"
3. Método Residencial

- Método de Cambios de Aire

El método de cambios de aire es similar al que se debe indicar en TRNSYS 13.1, pero en éste caso se presenta además la opción de considerar correcciones a la infiltración por la influencia del viento, asignando los comandos AIR-CHANGES/HR o INF-CFM/SQFT para especificar la magnitud de la infiltración. Con el comando AIR-CHANGES/HR el programa calcula la infiltración como una función lineal de la velocidad del viento, desde 0 infiltración a velocidad de viento = 0, hasta el valor especificado de AIR-CHANGES/HR a 10 mph (16.1km/h), independientemente de la dirección del viento. Si se especifica INF-CFM/SQFT, no habrá correcciones por efecto de viento y sólo habrá modificaciones por el itinerario que se especifique. En ambos casos es posible indicar el uso de itinerarios para que se lleve a cabo la infiltración.

- Método de CRACK

Cuando se usa el método de CRACK o “grietas”, no se especifican itinerarios. En esta modalidad el usuario debe seleccionar coeficientes de flujo de infiltración para las ventanas y muros exteriores. También es posible dar un valor para la palabra clave NEUTRAL-ZONE-HT en cada espacio, con el cual se especifica la distancia del punto medio del espacio al punto del edificio donde la diferencia de presión debida a los efectos de chimenea entre el interior y el exterior se desvanece.

- Método Residencial

Cuando se emplea el método Residencial, la infiltración se da por la siguiente fórmula:

$$\text{cambios de aire/hr} = C1 + (C2 * \text{velocidad de viento}) + (C3 * \Delta T) \quad (3.6.4.3)$$

donde ΔT es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior, y las constantes C1, C2 y C3 son entradas que el usuario debe indicar por medio del comando RES-INF-COEF.

En la tabla 3.6.13 se presentan los métodos disponibles para calcular la infiltración así como los comandos para manipular cada uno de ellos, tanto en TRNSYS 13.1 como en DOE-2.1E.

		DOE-2.1E			TRNSYS 13.1
	CAMBIOS	DE AIRE			CAMBIOS
	Con corrección por velocidad de viento	Sin corrección por velocidad de viento	CRACK	RESIDENCIAL	DE AIRE
AIR-CHANGES/HR	Requerido	n/a	n/a	n/a	n/a
INF-CFM/SQFT	n/a	Requerido	n/a	n/a	n/a
NEUTRAL-ZONE-HT	n/a	n/a	Opcional	n/a	n/a
INF-SCHEDULE	Opcional	Opcional	Opcional	Opcional	n/a
RES-INF-COEF	n/a	n/a	n/a	Opcional	n/a

Tabla 3. 6.13. Métodos para calcular la infiltración en DOE-2.1E y TRNSYS 13.1.

Ventilación.

En TRNSYS 13.1 es posible indicar la ventilación en términos de los cambios de aire por hora. Al igual que con la infiltración, se puede modificar con el uso de itinerarios, pero además es posible asignarle determinadas características. Los datos que se requieren para determinar la ventilación son: número de cambios de aire por hora, temperatura del flujo de aire (puede ser la del ambiente) y humedad del flujo de aire (también puede ser la del ambiente).

DOE-2.1E no tiene la opción de indicar la ventilación en el programa de LOADS, pero si se quisiera considerar, es posible mediante el uso del programa SYSTEMS, donde la ventilación se puede indicar como ventilación forzada asignando también cierto número de cambios de aire por hora y se lleva a cabo con las condiciones del aire exterior.

3.7 Características de las Salidas

El análisis de las salidas se puede dividir en dos partes. Por un lado, está el formato en el que se pueden presentar los resultados de las simulaciones y en segundo término, el tipo de información que proporcionan.

En TRNSYS 13.1, las salidas son asignadas con los TYPEs 25, 26, 27, 28 y 29, cuyas características se presentan en la tabla 3.7.1. Estos types, básicamente asignan el formato que van a adquirir las salidas de acuerdo a la conveniencia del usuario y aplican sus funciones para cualquier sistema que sea simulado, no solamente para edificios.

DOE-2.1E, por su parte, tiene también diversas opciones para la presentación de sus resultados. Las modalidades que presenta DOE-2.1E en este sentido son: Reportes de cargas, Reportes Horarios y Bloques de Reportes. Las características de estas modalidades se presentan también en la tabla 3.7.1.

TRNSYS 13.1			DOE-2.1E	
TYPE	NOMBRE	FUNCIONES	NOMBRE	FUNCIONES
TYPE 25	IMPRESORA	Imprime los valores de las entradas en intervalos de tiempo especificados	REPORTE DE CARGAS	Define un formato estándar para los reportes de salidas
TYPE 26	GRAFICADOR	Grafica una o más entradas en función del tiempo	REPORTES HORARIOS	Imprime los valores horarios de las variables especificadas en los Bloques de Reportes
TYPE 27	GRAFICADOR DE HISTOGRAMAS	Grafica histogramas hasta de 10 entradas para una mejor visualización	BLOCK DE REPORTES	Especifica el grupo de variables que se van a imprimir como salidas
TYPE 28	RESUMEN DE LA SIMULACIÓN	Integra las entradas en intervalos resumidos, realiza las operaciones aritméticas especificadas por el usuario e imprime los resultados		
TYPE 29	ANÁLISIS ECONÓMICO	Realiza un análisis del costo cíclico basado en los resultados de la simulación y la información de costos.		

Tabla 3.7.1 Opciones para especificar los formatos de las salidas en TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E

Al indicar los Reportes de Cargas en DOE-2.1E, se deben especificar dos tipos de instrucciones: VERIFICATION y SUMMARY. Estas instrucciones despliegan la información introducida de la descripción del edificio y los resultados de las cargas calculadas respectivamente.

Con respecto al tipo de información que se puede presentar en las salidas, son muchas las variables que se pueden determinar, por lo cual aquí solamente se mencionan las principales características de las mismas (para mayor detalle consultar los manuales respectivos).

Con respecto al edificio, en TRNSYS 13.1 son diferentes las salidas para las distintas modalidades de simulación, siendo más detalladas cuanto más detallada es la metodología de simulación. Así, por ejemplo, en el TYPE 12 sólo se pueden determinar 8 variables, en el TYPE 19 se pueden especificar 10 variables correspondientes al espacio más otras 5 relativas a las distintas superficies, teniendo un límite de 10 salidas máximo. En el TYPE 56 se pueden determinar hasta 16 variables referentes a los espacios más otras 6 opcionales para cada superficie, teniendo un límite de 100 salidas máximo.

Independientemente de las salidas del edificio, también es posible obtener las salidas de cada uno de los TYPEs que integran la descripción del edificio, en cuyo caso el número de variables dependerá del TYPE requerido.

En la tabla 3.7.2 se enlistan las opciones de salidas correspondientes al TYPE 56, por ser el más comparable a DOE-2.1E, cuyas salidas, referentes únicamente a los espacios, se enumeran en la tabla 3.7.3.

	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
1	T	Temperatura del aire de la zona
2	P	Demanda de energía sensible
3	Q_{surf}	Convección total a partir de todas las superficies de la zona
4	Q_{inf}	Ganancias de energía por infiltración
5	Q_v	Ganancias de energía por ventilación
6	Q_{cplg}	Ganancias debidas a intercambio convectivo con zonas adyacentes
7	$Q_{g,c}$	Ganancias convectivas internas
8	ΔU	Cambio en la energía sensible interna de la zona desde el principio de la simulación
9	ω	Humedad absoluta del aire de la zona
10	Q_{lat}	Demanda de energía latente
11	$Q_{g,l}$	Ganancias netas de energía latente
12	S_{ol}	Energía solar total entrando a través de la ventana
13	$Q_{g,r}$	Ganancias totales por radiación interna
14	S_i	Radiación total absorbida por todas las superficies interiores
15	S_o	Radiación total absorbida por todas las superficies exteriores
16	$Q_{surf,o}$	Ganancias totales por radiación de onda larga y convección de las superficies exteriores
17	$T_{s,i}$	Temperatura superficial interior
18	$T_{s,o}$	Temperatura superficial exterior
19	$Q_{comb,s,i}$	Energía de la superficie interior incluyendo convección y radiación de onda larga hacia las otras superficies
20	$Q_{comb,s,o}$	Energía de la superficie exterior incluyendo convección del aire y radiación de onda larga
21	$S_{s,i}$	Radiación total absorbida por la superficie interior
22	$S_{s,o}$	Radiación total absorbida por la superficie exterior

Tabla 3.7.2 Salidas opcionales de TRNSYS 13.1 – TYPE 56

CÓDIGO		DESCRIPCIÓN
1	QWALQ	Carga instantánea del muro (uw)
2	QCELQ	Carga instantánea del techo (uw)
3	QWINC	Carga por conducción de la ventana (uw)
4	QWALD	Carga retardada del muro (uw)
5	QCELD	Carga retardada del techo (uw)
6	QINTW	Carga interior del muro (uw)
7	QUGF	Carga del suelo al piso (uw)
8	QUGW	Carga del suelo al muro (uw)
9	QDOOR	Carga de la puerta (uw)
10	QEOPS	Carga sensible por equipamiento (uw)
11	QEOPS2	Carga sensible por otras fuentes (uw)
12	QPPS	Carga sensible por personas (uw)
13	QTSKL	Carga por otros elementos (uw)
14	QSOL	Carga solar (uw)
15	QPLENUM	Carga del espacio entre el plafón y el techo (uw)
16	QWALD	Carga instantánea del muro (w)
17	QCELQ	Carga instantánea del techo (w)
18	QWINC	Carga por conducción de la ventana (w)
19	QWALD	Carga retardada del muro (w)
20	QCELD	Carga retardada del techo (w)
21	QINTW	Carga interior del muro (w)
22	QUGF	Carga del suelo al piso (w)
23	QUGW	Carga del suelo al muro (w)
24	QDOOR	Carga de la puerta (w)
25	QEOPS	Carga sensible por equipamiento (w)
26	QEOPS2	Carga sensible por otras fuentes (w)
27	QPPS	Carga sensible por personas (w)
28	QPPL	Carga latente por personas (uw)
29	QEQL	Carga latente por equipamiento (uw)
30	QEQL2	Carga latente por otras fuentes (uw)
31	QINFL	Carga latente por infiltración (uw)
32	QTSKL	Carga por otros elementos (w)
33	QSOL	Carga solar (w)
34	QPLENUM	Carga del espacio entre el plafón y el techo (w)
35	QLITE	Carga ligera (uw)
36	QLITEW	Carga ligera (w)
37	QINFS	Carga sensible por infiltración (uw)
38	QSELECT	Carga por aparatos dentro del espacio
39	QFEMINF	Infiltración (m ³ /min)
40	QSUMW	Suma de todas las cargas (w) excepto infiltración y latentes
41	ZCOND	Conductancia del espacio
42	QZS	Carga sensible del espacio
43	QSL	Carga latente del espacio
44	QZTOT	Carga total del espacio
45	QZLTEL	Carga de iluminación del espacio
46	QZEQEL	Carga del equipamiento del espacio
47	QZGAS	Demanda de gas del espacio
48	QZHW	Demanda de agua caliente del espacio

Tabla 3.7.3 Salidas opcionales en DOE-2* (espacio)

* (uw) = unweighted, es decir, sin aplicar los factores de carga, (w) = weighted.

En DOE-2.1E, todas las variables de salidas se controlan con el **BLOCK DE REPORTES**, siendo posible determinar las salidas relativas al edificio, al espacio, a las superficies y a muchos otros elementos como el clima, ángulo de incidencia solar, etc., las cuales se determinan como variables Globales. Las variables que se pueden determinar también son numerosas: 47 variables globales diferentes, 45 variables relativas al edificio, 48 variables para los espacios, 19 variables para muros, 18 para las ventanas y 6 para las puertas.

3.8 Capacidad de los Simuladores

Tanto DOE-2.1E como TRNSYS 13.1 tienen un número limitado de elementos que pueden integrar dentro de una simulación. Esta característica limita a su vez a los programas para simular edificios en los que se tengan muchos elementos constructivos de diferente constitución, siendo necesario, en dado caso, simplificar la simulación suponiendo elementos que se pueden definir como uno sólo o realizando la simulación en dos o más partes, es decir, como si fueran dos o más edificios en lugar de uno.

En la tabla 3.8.1, se puede apreciar que DOE-2.1E presenta una capacidad ampliamente mayor que TRNSYS, sin embargo, en TRNSYS existe la posibilidad de modificar el código fuente de **BID** y del **TYPE 56** para incrementar su capacidad, lo cual está en función de los requerimientos de memoria para la ejecución del programa.

TRNSYS			DOE-2	
TYPE	MÁXIMO (mainframe)	PC	CÓDIGO	No.
LAYER	40	25	DAY-SCHEDULE	60
WALL	40	25	WEEK-SCHEDULE	40
WINDOW	25	15	SCHEDULE	40
ORIENTATION	25	15	RUN-PERIOD	1
GAIN	25	10	BUILDING-LOCATION	1
INFILTRATION	25	10	BUILDING-SHDE	64
VENTILATION	25	10	MATERIAL	128
HEATING	25	10	LAYERS	16
COOLING	25	10	CONSTRUCTION	32
SCHEDULE	25	15	GLASS-TYPE	32
INPUT	40	30	SPACE-CONDITIONS	32
ZONES	25	10	SPACE	64
TOTAL WALLS/BLDNG	250	100	EXTERIOR-WALL/ROOF	128
TOTAL WINDOWS/BLDNG	100	50	INTERIOR-WALL/ROOF	128
MAX.SURF/ZONE	20	20	WINDOW	128
TOTAL OUTPUTS	100	100	DOOR	64
			UNDERGROUND-WALL /	64
			UNDERGROUND-FLOOR	
			DESIGN-DAY	3
			LOADS-REPORT	1
			TITLE	5
			PARAMETER	50
			HOURLY-REPORT	16
			REPORT-BLOCK	64
			U-NAMES	352

Tabla 3.8.1 Número máximo de elementos permisibles en TRNSYS 13.1 (BID) y DOE-2 dentro de una simulación.

3.9 Disponibilidad de los Modelos

Como se ha mencionado anteriormente, tanto TRNSYS como DOE-2.1E han sido desarrollados en los Estados Unidos, pero debido a su origen y objetivos, su comercialización es diferente.

Por un lado, TRNSYS no está disponible para computadoras mainframe, sólo para PCs. La versión 14.2 (la más nueva) puede correr en Windows 95 y Windows NT para programas con interfase para

TRNSYS, aunque el código fuente que se distribuye se puede compilar y correr en cualquier plataforma de FORTRAN.

Para la comercialización de TRNSYS sólo se cuenta con dos distribuidores en los Estados Unidos así como distribuidores en Alemania, Francia, Bélgica y Suiza. Los distribuidores en los Estados Unidos son el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin (donde es desarrollado el programa) y la compañía Thermal Energy System Specialists (TESS).

DOE-2, por su parte, no es comercializado por el laboratorio que lo desarrolla (LBNL), sino por compañías independientes que han realizado diversas modificaciones y/o atributos al programa para su distribución.

DOE-2 tiene dos distribuidores de versiones para computadoras mainframe: el Energy Science/Technology Software Center (ESTSC), que distribuye las versiones DOE-2.1D y 2.1E, y la compañía Finite Technologies, Inc., que distribuye la versión FTI-DOE v2.1E. Actualmente ya se encuentra a la disposición del público la versión PowerDoe, que contiene muchas características nuevas con respecto a la anterior (v. 2.1E), pero solamente trabaja en unidades inglesas.

En cuanto a las versiones para PCs, existen varias compañías y versiones del programa, las cuales se enumeran en la tabla 3.9.1, así como las principales características de los programas.

Los requerimientos mínimos para cualquiera de las versiones para computadoras personales es una computadora 386 con procesador matemático y 4MB en RAM.

VERSIÓN	CARACTERÍSTICAS	DISTRIBUIDOR
ADM-DOE2	Corre en ambiente Windows y DOS y contiene los últimos implementos necesarios para correr la versión 2.1E	ADM Associates, Inc.
CECDOEDC	Es una versión para microcomputadora con pre- y post-procesadores diseñados estrictamente para su uso en el Edo. De California	California energy Comission
DOE-24/Comply-24	Es un programa que sirve tanto para los estándares de energía no residencial del estado de California, como una versión aislada de DOE-2.1E que incluye un pre-procesador para introducir fácilmente las entradas del programa	Gabel-Dodd Associates
DOE-Plus	Está diseñado para introducir interactivamente la descripción del edificio, correr DOE-2 y plotear gráficas de los resultados de la simulación	ITEM Systems
EZDOE	Es una versión de uso fácil de DOE-2, que contiene como principales características: llenado de datos en espacios predeterminados, chequeo de errores dinámico, soporte de mouse y reportes en gráficas	Elit Software, Inc.
FTI-DOEv2.1E	Es una versión optimizada de DOE2.1E. Contiene todas las características del programa original. Corre en MSDOS, Windows3.x, Windows NT, OS/2, RS/6000(AIX), NeXT, SUN, UNIX, etc.	Finite Technologies, Inc.
MICRO-DOE2	Es una versión de DOE-2.1E, corre en ambiente Windows o DOS e incluye procesamiento automático de clima, creación de archivos de partidas (batch file) y Guía del Usuario con instrucciones de cómo determinar un drive en RAM.	ACROSOFT / CAER Engineers
PRC-DOE2	Corre en memoria extendida y es compatible con cualquier compilador de memoria VCOI.	Partership for Resource Conservation
VisualDOE 2.5 para windows	Es una versión de DOE-2.1E que corre en ambiente Windows y permite que el edificio sea construido en base a bloques estandarizados.	Eley & Associates

Tabla 3.9.1 Versiones comerciales de DOE-2 en los Estados Unidos.

DOE-2 cuenta con distribuidores en Sur América, Portugal, España, Italia, Grecia, Singapur, Malasia, Indonesia, Tailandia, Filipinas, Hong Kong, China, Taiwan, Japón, Korea, Australia, Alemania y Suiza y cuenta con además con diversos programas de pre-procesamiento y post-procesamiento de datos, los cuales también son comercializados por diversas compañías y le dan mayor flexibilidad y atributos al programa.

Capítulo 4

APLICABILIDAD DE LOS MODELOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Si bien los procesadores de datos, tanto de TRNSYS 13.1 como de DOE-2, pueden generar bases de datos utilizables por los programas a partir de diversas características, es necesario identificar la disponibilidad de información en la República Mexicana para estos fines y bajo qué circunstancias los datos obtenidos a través de los procesadores pueden tener validez.

En primera instancia, la información necesaria para correr los programas se puede dividir en dos principales rubros:

- a) información climatológica, y
- b) información de las propiedades de los materiales constructivos.

Estos dos tipos de información deben tener ciertas características para poder ser procesadas en los subprogramas de los simuladores, las cuales se definen a continuación.

4.1 Información Climatológica

Los dos programas analizados utilizan datos horarios de diversos parámetros para poder llevar a cabo una simulación. Como principal información, los datos que requieren forzosamente son los siguientes:

- Temperatura de bulbo seco en °C o °F
- Humedad Relativa en % o Humedad Absoluta
- Incidencia Solar en W/m^2 o kJ/h m^2

Estos datos son utilizados por los programas de forma horaria, ya sea que los contengan los archivos de clima (en el caso de DOE-2.1E), o que sean estimados a partir de los valores promedio mensuales (en TRNSYS 13.1).

En México, los únicos registros climatológicos que se tienen disponibles al público, con suficientes parámetros registrados, son las Normales Climatológicas de 30 años del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), donde se tienen registrados y clasificados 94 observatorios y 4515 estaciones climatológicas, distribuidas en todo el territorio mexicano. Aparentemente con estos registros se podría decir que existe la suficiente información climatológica para utilizarla en los simuladores, pero las características de estos registros los limitan marcadamente en su aplicación por las siguientes razones:

1. Las Normales Climatológicas sólo contienen datos de los valores medios mensuales para cada parámetro, no datos horarios como los requieren los programas. En el caso de TRNSYS 13.1 se pueden estimar los valores horarios a partir de datos disponibles, pero como se indicó en el capítulo anterior, por estar el procesador de datos desarrollado a partir de correlaciones de climas templados, las estimaciones para otros tipos de climas, pueden estar muy alejadas de la realidad. En DOE-2.1E, no es posible siquiera generar los valores horarios a partir de esta base de datos, sino que es necesario procesarlos exteriormente para este fin y posteriormente volverlos a procesar en DOE-2.1E para poder ser utilizados.

2. Algunas de las unidades en que se registran los diferentes parámetros en la Normales Climatológicas no se adecuan a los requerimientos de los programas, por ejemplo, la incidencia solar, aparece en términos del total de horas de insolación mensuales. TRNSYS 13.1 requiere éste parámetro en función de la cantidad de radiación incidente sobre un metro cuadrado (kJ/h m^2) y DOE-2.1E ya sea en función de la radiación por unidad de área o en función de la nubosidad. En este caso, DOE-2.1E requiere los datos de nubosidad definidos en dos formas:

- a) Cantidad de nubes, que se especifica en una escala del 0 al 10, siendo 0 un día totalmente despejado, y 10 un día completamente nublado (nublado-cerrado), y
- b) Tipo de Nubes. Aquí se definen 3 valores: 0 para cirros, 1 para estratos y 2 para un intermedio entre cirros y estratos.

En las normales no existen datos que indiquen el tipo de nubes, pero DOE-2.1E sugiere los siguientes valores: 0 para los meses de verano, 1 para los meses de invierno y 2 para los meses de primavera y otoño, pero es bien claro que en México, las condiciones meteorológicas no son tan definidas, por lo que se concluye que, los datos de nubosidad disponibles no son aplicables, pues las normales sólo consideran tres parámetros: días despejados, días medio nublados y días nublado-cerrados, todos como valor medio mensual, y resulta imposible distribuirlos en una escala del 0 al 10, pues aunque se pudiera decir que un día despejado caería entre 0 y 2, un día medio nublado entre 3 y 7 y uno nublado-cerrado entre 8 a 10 es, no se tienen bases para definir con exactitud los valores intermedios (1, 4, 5, 6, 9) y mucho menos para los valores horarios.

3. Las normales más recientes corresponden al periodo de 1951 a 1980, es decir, que desde hace 18 años no han sido actualizadas, o al menos, todavía no están disponibles al público, e incluso, en algunos casos, sólo se tienen las Normales Climatológicas²⁹ para el periodo de 1941 a 1970.

Con estas características, se puede decir que de las Normales Climatológicas²⁹, sólo son utilizables, para TRNSYS 13.1, los valores de temperatura, humedad relativa y velocidad y dirección del viento, y para DOE-2.1E, ninguno.

Con respecto a la radiación solar en la República Mexicana, entre las publicaciones más relevantes que actualmente proporcionan información aplicable en los modelos de simulación, se encuentran la de Tejeda M. et al.²⁷ Almanza, et al.²⁸, Fernández et al.²⁹ y Galindo et al.³⁰, aunque deben ser

tomadas con cierta reserva, ya que en ningún caso se trata de datos medidos en sitio, sino que han sido estimados de diversas maneras como a continuación se menciona:

1. La publicación de Tejeda M. et al.³⁰, "Atlas Solar de la república Mexicana", contiene mapas de la República Mexicana donde se grafica la distribución sobre el territorio nacional de la irradiación solar de manera mensual, estacional y anual, conteniendo los parámetros: Soleamiento Efectivo, Irradiación Solar Global, Irradiación Directa e Irradiación Difusa. Estos valores fueron calculados a partir de porcentajes mensuales de la nubosidad regional obtenida de los satélites NIMBUS III y ESSA-8 (APT), cubriendo la totalidad de México, dividido en una red de 117 cuadros de aproximadamente 130km². De acuerdo a la misma publicación, la precisión lograda a partir de estas fuentes muestra una diferencia entre los datos calculados y medidos de 5% o menos. Los parámetros mencionados están indicados en Cal/cm²-día, mismos que se pueden convertir a las unidades requeridas por los programas, pero hay que observar que, aún cuando se contemplan las componentes directa y difusa de la radiación solar, el intervalo de tiempo más corto entre las mediciones es de un mes, además de que no están dadas para las ciudades puntualmente, sino que es necesario hacer aproximaciones a las líneas de irradiación graficadas.
2. En la publicación de Almanza, et al.³¹, "Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana", también se calcula la irradiación solar global diaria promedio por mes, pero en su caso, en MJ/m² (unidades aceptadas por TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E). Los datos de esta publicación se calcularon mediante los datos de horas de insolación, a partir del método

de Reddy, el cual, además, emplea los parámetros: latitud del lugar, longitud promedio del día, número de días lluviosos en el mes y humedad relativa promedio por día (todos estos datos fueron obtenidos de las normales climatológicas). Con éstos datos se realizaron mapeos mensuales que establecen la distribución de la irradiación global en la República Mexicana. De acuerdo a la bibliografía, con este método se puede obtener la irradiación global con desviaciones menores de diez por ciento³¹.

3. En el "Cálculo de la Irradiación Solar Instantánea en la República Mexicana", publicado por Fernández et al³², se calcula la radiación solar global y difusa diaria promedio por mes en base a un algoritmo propuesto por los autores, validando sus resultados al compararlos con datos experimentales. Al igual que en las publicaciones mencionadas anteriormente, se presentan mapas mensuales que establecen la distribución de la irradiación (global y difusa) en la República Mexicana.
4. Los únicos datos horarios disponibles, son los que presenta Galindo et al.³³, en su publicación "Irradiación Solar Global en la República Mexicana: Valores Horarios Medios". Estos datos fueron obtenidos de los radiómetros VISSR embarcados en los satélites geoestacionales SMS-2 y GOES-2, de donde se pudieron generar los valores de la irradiación solar global a partir de siete imágenes digitales que cubren una gran parte del territorio nacional (90° a 110° Oeste y 16° a 30° Norte). Debido a la cobertura de las imágenes, únicamente se tienen los datos disponibles para 27 ciudades de la República Mexicana (capitales de Estado). De acuerdo a la bibliografía, los métodos que emplean este tipo de datos, han sido probados y validados con datos radiométricos

de superficie de alta calidad, mostrando errores estándar que varían entre el tres y el cinco por ciento.

Como se observa, la información contenida en estas *bases de datos* puede ser procesada por TRNSYS 13.1, ya sea para obtener los datos horarios a partir de los valores medios mensuales, o para calcular las componentes directa y difusa de la radiación solar a partir de los datos horarios. De este modo, para TRNSYS 13.1 se puede contar con todos los parámetros climatológicos necesarios para realizar una simulación, pero para DOE-2.1E, es prácticamente imposible, pues la única fuente con datos horarios no contiene estimaciones de radiación difusa.

No obstante, en México se cuenta con los registros meteorológicos grabados por los aeropuertos internacionales, disponibles comercialmente a través de SENEAM, cuyas características se adaptan perfectamente a las necesidades de DOE-2.1E, pero se debe tener en cuenta que tales aeropuertos se establecen generalmente en las afueras de las ciudades, donde las características del clima presentan ciertas inconsistencias con respecto al interior de las mismas, además que no corresponden a un año típico sino a un año específico, el cual puede no representar las características medias del clima dominante.

Se puede concluir, por tanto, que con la disponibilidad de la bases de datos citadas (en lo referente a climatología), el programa más factible de utilizar en la República Mexicana es TRNSYS 13.1, ya que DOE-2.1E, por lo particular de sus especificaciones, resulta sumamente limitado.

4.2 Materiales y Sistemas Constructivos

Otro tipo de información que podría limitar la aplicación de los modelos es la disponibilidad de las características termofísicas de los materiales utilizados en la construcción mexicana. En términos generales, los dos programas requieren los siguientes datos de los materiales constructivos:

- espesor
- conductividad térmica
- densidad del material
- calor específico

El espesor no es problema determinarlo, pues estará dado de acuerdo a las características de diseño del edificio y/o de medidas estándares de los materiales, pero la conductividad térmica, la densidad del material y el calor específico son datos que muy difícilmente proporcionan las compañías fabricantes.

En la actualidad, sólo algunos materiales prefabricados cuentan con alguno de estos datos, pero la gran mayoría carece de ellos y no existe, hasta el momento, alguna fuente que contenga datos medidos en la República Mexicana de las propiedades térmicas de los materiales.

Entre la literatura existente que incluye tablas con este tipo de información para México, se presentan datos con propiedades de materiales aplicables en nuestro país, pero generalmente son extraídos de

las publicaciones de la ASHRAE y por tal razón, los cálculos térmicos, ya sea en estado permanente o simulaciones en computadoras, utilizan estas características. Afortunadamente se ha observado que los resultados obtenidos con dichos datos pueden representar adecuadamente las condiciones constructivas mexicanas, por lo que este aspecto no se considera una limitante.

Por otra parte, también son requeridas las propiedades ópticas de los materiales traslúcidos ubicados en ventanas, aunque cada programa las requiere de manera diferente.

Como se indicó en el capítulo 3, TRNSYS 13.1 requiere los datos de transmitancia (τ), absorptancia (α) y reflectancia (ρ). Estos datos deberían ser proporcionados por las compañías fabricantes, pero en la realidad sólo algunas de ellas los tienen completos e incluso, en ocasiones no están correctos, pues la suma de τ , α y ρ suele ser mayor de 1. Debido a esto, las simulaciones en ocasiones se hacen con valores publicados en diferentes fuentes, haciendo aproximaciones de los vidrios propuestos con la información existente.

En el caso de DOE-2.1E, esto no es problema debido a las diferentes maneras en que se puede introducir esta entrada (ver tabla 3.6.10), además de que se puede consultar la librería de ventanas del programa y hacer también una aproximación de las propiedades del vidrio propuesto a las contenidas en la base de datos.

Con estas bases, se puede decir que las características ópticas de las ventanas tampoco son una limitante para correr los programas, pero si implican cierto criterio por parte del usuario para indicar los valores correctamente.

Capítulo 5

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE TRNSYS v.13.1

Antes de iniciar con las simulaciones definitivas para la comparación de los modelos, es conveniente realizar un análisis para identificar la importancia de la precisión con que se deben determinar algunos parámetros, principalmente aquellos cuyos valores deben ser introducidos a criterio del usuario y que pueden tener fuerte influencia en los resultados.

Es importante mencionar, que debido a los altos costos de los programas, su adquisición para llevar a cabo las simulaciones necesarias fue imposible durante la realización del presente estudio, por lo que los resultados que aquí se presentan, son producto de las corridas efectuadas gracias a la colaboración de varias personas e instituciones. No obstante, debido a las circunstancias, la disponibilidad de DOE-2.1E ha sido hasta cierto punto limitada, por lo que su aplicación, de manera experimental, sólo se llevó a cabo en el último capítulo de este trabajo.

Por las razones antes mencionadas, TRNSYS 13.1 ha sido el único modelo analizado en este capítulo. Cabe mencionar que también es el modelo que presenta más parámetros cuyas entradas quedan a criterio de usuario, pues en DOE-2.1E se proporciona mayor información o criterios para asignar los valores de las mismas.

5.1 Metodología

El procedimiento general para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se realizó de la siguiente manera:

1. Se identificaron los parámetros cuyas entradas quedan prácticamente a criterio del usuario, o no se tienen las suficientes bases dentro del manual del programa para determinarlas con exactitud, pudiendo de esta manera generar errores en los resultados. Los parámetros seleccionados corresponden al subprograma **BID**, la modalidad más detallada de **TRNSYS 13.1**
2. Se emplearon archivos con características definidas para un espacio, en los cuales fue posible realizar modificaciones a los parámetros determinados.
3. Se modificó el valor de un solo parámetro por cada simulación para tener el mejor control posible en las observaciones de los resultados.
4. Cada parámetro se analizó por separado en base a los resultados después de haber asignado diferentes valores.
5. Las comparaciones se hicieron en base a las variaciones de la temperatura interior del espacio, teniendo como principal objeto de observación, las gráficas de las mismas, de manera horaria, para determinados períodos.
6. Como resultado final, se determinó la importancia que tiene el definir con precisión cada uno de los parámetros analizados, en base a su influencia en las variaciones de temperatura del aire del interior del espacio.

5.2 Determinación de los Parámetros Factibles de Análisis

Una vez que se revisaron las entradas del modelo, se pudieron identificar los siguientes parámetros que presentan cierta incertidumbre para determinar sus valores:

- Resistencia térmica del aire
- Coeficiente interior de transferencia superficial por convección
- Coeficiente exterior de transferencia superficial por convección
- Infiltración
- Ventilación
- Intercambio de aire con los espacios adyacentes.

5.3 Características de los Espacios Simulados

Las simulaciones correspondientes al análisis de sensibilidad se llevaron a cabo con dos espacios muy diferentes uno del otro, los mismos que se han utilizado en los capítulos 6 y 7 para determinar la precisión de los programas.

Las características de los dos casos de estudio difieren en cuanto a ubicación, tipo de clima, función, características constructivas y período de análisis. Su descripción detallada se puede ver en los siguientes capítulos, no obstante, aquí se hará una breve descripción de las características más relevantes para comprender mejor los análisis correspondientes.

5.3.1 Primer Caso de Estudio: Una Habitación

En primer término, se cuenta con una habitación ubicada en un edificio multifamiliar localizado en la Ciudad de México, D.F.. Los datos de clima fueron obtenidos durante cuatro días consecutivos en Octubre de 1997, reportándose un clima muy estable (con oscilaciones térmicas menores a 10°C).

La habitación consiste en un espacio cuadrangular, en el que tres de sus cuatro lados y el piso tienen espacios adyacentes bajo sus mismas condiciones térmicas. Su única fachada cuenta con una orientación poniente. La cubierta es prácticamente horizontal y recibe la radiación solar todo el día. Tanto la cubierta como dos de los muros colindantes y el piso contienen aire en su interior, por tal motivo, este caso se ha elegido para analizar la influencia del valor asignado a la resistencia térmica del aire. Esta variable sólo se ha modificado en el caso del techo, pues tanto los muros como el piso se han considerado adiabáticos (para más detalle ver el capítulo 6).

5.3.2 Segundo caso de Estudio: Un Espacio destinado para Laboratorio de Investigación

El segundo caso que se utilizó para el análisis de sensibilidad fue un espacio destinado para laboratorio de Investigación, en Hermosillo, Sonora. En este caso, se cuenta con un período de datos climatológicos más amplio para efecto del análisis (del 8 al 25 de diciembre de 1997), durante el cual se pueden percibir dos tipos diferentes de clima, por un lado, un clima extremo, con oscilaciones mayores a 15°C , y por otro lado, un clima templado, con oscilaciones diarias entre 10 y 15°C .

Este espacio tiene forma cuadrangular, su única fachada tiene una orientación sur, en la cual se ubica una ventana que ocupa aproximadamente el 30% de la superficie. Sus otros tres lados, así

como el piso, se encuentran en colindancia con otros espacios, de los cuales, algunos se han simulado para considerar su efecto en el espacio analizado y otros se han supuesto adiabáticos (para más detalle ver el capítulo 7).

La cubierta de este espacio también es horizontal y recibe la radiación solar todo el día. Los elementos no contienen aire en su interior, de tal manera que la resistencia del aire no influye de manera alguna en los resultados. Considerando que en este caso se cuenta con un período más amplio de análisis, se ha utilizado para analizar los demás parámetros determinados anteriormente.

5.4 Características de los Parámetros

Resistencia del aire

El valor de la resistencia del aire se debe determinar al indicar las capas (LAYERS) que componen un elemento estructural, ya sea muro, piso o techo, y tiene influencia en la determinación de la transmitancia del elemento en cuestión, conocida como el “valor-U”.

Este valor puede tener grandes variaciones y resulta muy difícil estimar un valor con exactitud. En este sentido, la ASHRAE⁹ ha propuesto algunos valores que dependen del espesor de la capa del aire, de su posición dentro del elemento (horizontal, vertical, inclinada), de la emitancia del elemento que lo contiene y de la dirección del flujo de calor a través del muro, piso o techo.

Para realizar el análisis de sensibilidad con este parámetro, se ha escogido, de la fuente antes mencionada, el valor más bajo, el más alto y un valor intermedio, independientemente de su posición o su espesor dentro del muro o losa. Dichos valores se presentan en la siguiente tabla.

VALOR MÁS ALTO (m²°C /W)	VALOR MEDIO (m²°C /W)	VALOR MÁS BAJO (m²°C /W)
2.28	1.08	0.128

Tabla 5.3.1 Diferentes valores de resistencia térmica del aire, según la ASHRAE⁹.

En la configuración original, tanto el techo como el piso del espacio analizado (la habitación) presentan un 48% de su área con una capa intermedia de aire, la cual se ha mantenido constante, salvo en un caso donde el techo se ha propuesto como un elemento macizo, quedando esta última propuesta como la principal base de comparación. De este modo, se han planteado los siguientes casos de análisis:

CASO	RESISTENCIA DEL AIRE (m² °C/W)
1	R = 0.128
2	R = 1.08
3	R = 2.28
4 (BASE DE COMPARACIÓN)	LOSA MACIZA (sin aire en su interior)

Tabla 5.3.2 Casos propuestos para el análisis de la resistencia del aire.

Coefficientes de Transferencia Superficial de calor por Convección

Los valores de los coeficientes de transferencia superficial interior (h_i) y exterior (h_o) por convección presentan también cierta incertidumbre para determinar su valor, debido a que dependen de diversas circunstancias y en realidad no pueden ser valores constantes.

Como se hizo la observación en el capítulo 2, este coeficiente depende, entre otros aspectos, de la viscosidad y velocidad del aire, la cual varía de acuerdo a su cercanía con la superficie, generando que de un punto a otro el coeficiente por convección adquiera diferentes valores.

Al tratarse de una superficie interior, la velocidad del aire no influye drásticamente, pues los valores que ésta pueda adquirir no serán marcadamente diferentes, sin embargo, para superficies exteriores, el viento cambia constantemente en magnitud y dirección, pudiendo afectar de manera importante el valor del coeficiente.

Tratándose de superficies interiores, el valor del coeficiente por convección depende más bien de la diferencia de la temperatura del aire y puede variar dependiendo de la posición y características de la superficie, ya que si se trata de una superficie horizontal, por ejemplo, en un piso el flujo del calor será hacia arriba, pero en un techo será diferente, pues debido a que el aire caliente se ubica sobre el aire frío, por diferencia de densidad, teóricamente no debería existir convección. En este caso, la convección se lleva a cabo por agentes secundarios, como la diferencia de temperaturas entre las superficies interior y exterior del techo⁹.

Debido a todas estas circunstancias, las ecuaciones para calcular los coeficientes de convección varían de un autor a otro, pudiéndose encontrar grandes diferencias. La ASHRAE, por ejemplo, divide las ecuaciones para calcular el coeficiente de convección natural, de acuerdo al tipo de superficie, en a) superficies cilíndricas, b) superficies verticales, c) superficies horizontales con flujo de aire hacia arriba y d) superficies horizontales con flujo de aire hacia abajo. Cada una de

estas clasificaciones, además las divide dependiendo si el flujo de aire es laminar (en superficies pequeñas) o turbulento (superficies grandes).

En el caso de superficies exteriores, las ecuaciones las divide de acuerdo a los siguientes criterios:

a) superficies planas verticales con viento entre 5 y 30 m/s, b) superficies planas verticales con viento menor a 5 m/s, c) superficies cilíndricas con flujo transversal y d) superficies esféricas.

Si se aplican las ecuaciones de la ASHRAE⁹, el coeficiente de convección natural, para un muro vertical, puede ir desde 1.3 W/m² °C para una diferencia de temperatura de 1°C, hasta 3.8 W/ m² °C para una diferencia de 25°C, mientras que en un piso puede ir desde 0.78 W/m² °C hasta 1.78 W/m² °C, para las mismas diferencias de temperatura, respectivamente.

Si se considera un flujo de aire debido a ventilación u otra circunstancia, el valor del coeficiente se incrementará fuertemente en función de la velocidad del viento. En el exterior, por ejemplo, aplicando las ecuaciones de la ASHRAE⁹, si se considera una velocidad de viento promedio de 2m/s, el coeficiente por convección puede adquirir un valor de aproximadamente 13.9 W/m² °C y aun más si el flujo de aire tiende a ser turbulento.

Con respecto al coeficiente de convección exterior, en el capítulo 3 se mencionó que TRNSYS 13.1 propone la siguiente fórmula:

$$h_{\text{con}} = 5.7 + 3.8 W \quad (\text{W/ m}^2 \text{ °C}) \quad (3.4.2.3)$$

donde W = la velocidad de viento en m/s.

Esta ecuación fue la que se aplicó para obtener los valores de los coeficientes de convección exterior utilizados en el análisis correspondiente.

Teniendo en cuenta estas variantes, se asignaron valores diferentes para:

- Superficies expuestas al viento (exterior)
- Superficies verticales interiores
- Superficies horizontales con flujo hacia arriba (pisos), y
- Superficies horizontales con flujo hacia abajo (techos)

Además, el análisis comparativo se realizó bajo el siguiente criterio:

- Mantener un valor constante de los coeficientes por convección interior y modificar el valor del coeficiente de convección exterior,
- Mantener el valor del coeficiente exterior constante y modificar los valores del coeficiente interior.
- Mantener el valor del coeficiente interior constante y modificar los valores del coeficiente exterior de acuerdo a la velocidad del viento.

De esta manera, los valores de los coeficientes determinaron las siguientes corridas:

Corrida No.	h_i Pisos	h_i Muros	h_i Techo	h_o
1	11.9	8.33	4.16	16.7
2	11.9	8.33	4.16	11.11
3	11.9	8.33	4.16	5.55
4	8.89	6.25	3.05	16.7
5	5.97	4.16	2.08	16.7
6	5.97	4.16	2.08	20.8
7	5.97	4.16	2.08	VARIABLE*

Tabla 5.3.3 Corridas propuestas para realizar el análisis de los Coeficientes de transferencia por convección (h_{con} en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$). *Depende de la velocidad de viento.

En la corrida No. 6, el valor de h_o corresponde a una velocidad de viento de 4m/s, que aunque parece un poco alto, se consideró por ser el valor asignado por default por el procesador de datos climáticos de TRNSYS (TYPE 54).

En la corrida No. 7, se asignó la fórmula propuesta por TRNSYS 13.1 para h_o (cuyos resultados prácticamente no varían con respecto a la fórmula propuesta por la ASHRAE⁹) dentro del *deck* de simulación, con el propósito que h_o variara de acuerdo a la velocidad de viento. Como ya se mencionó, las corridas para estos casos se llevaron a cabo con el espacio ubicado en Hermosillo, Sonora.

Tomando como base las corridas propuestas en la tabla 5.3.3, el análisis se llevó a cabo en tres comparaciones diferentes:

- a) comparación de las corridas 1, 2 y 3,
- b) comparación de las corridas 1, 4 y 5, y
- c) comparación de las corridas 5, 6 y 7

Infiltración, Ventilación e Intercambio de Aire con Espacios Adyacentes

En TRNSYS 13.1, tanto la infiltración como la ventilación y el intercambio de aire con otros espacios están dados en función del número de cambios de aire por hora. Este valor es introducido por el usuario sin contar con algún parámetro que ayude a determinarlo, por lo cual, para el análisis de estos parámetros se compararon diferentes valores escogidos arbitrariamente, pero que correspondieran a valores normales típicos, o a valores incrementados con cierta exageración.

Se determinaron cuatro corridas para el análisis de cada parámetro, el primero de cada uno es un valor de 0 cambios de aire y sirve como el principal parámetro de comparación. Las simulaciones se realizaron con la convicción de que al modificar un parámetro, los otros dos permanecen constantes. Es así como se determinaron las siguientes corridas:

Corrida No.	Infiltración	Ventilación	Intercambio
1	0	0	0
2	0.3	0	0
3	1	0	0
4	5	0	0
5	0	1	0
6	0	5	0
7	0	10	0
8	0	0	1
9	0	0	5
10	0	0	10

Tabla 5.3.4 Valores de cambios de Aire asignados para infiltración, ventilación e intercambio con espacios adyacentes.

Con base en la tabla anterior, el análisis de la infiltración se realizó comparando las salidas de las corridas 1, 2, 3 y 4, el de la ventilación con las corridas 1, 5, 6 y 7 y el del intercambio de aire con los espacios adyacentes con las corridas 8, 9 y 10.

Infiltración.

La infiltración se lleva a cabo a través de las pequeñas aberturas que quedan entre las puertas y muros o entre las ventanas y los muros y se presenta durante las 24 horas del día. Debido a que estas aberturas son relativamente pequeñas, la cantidad de cambios de aire que se pueden presentar en una hora son muy pocos, sin embargo se han simulado hasta 5 cambios de aire por hora para ver sus efectos. En la gráfica 5.6.5 se pueden observar las variaciones en la temperatura interior como producto de las variaciones de éste parámetro.

Ventilación

Aunque en el caso de la ventilación los cambios de aire también se realizan con el ambiente exterior, existen importantes diferencias con respecto a la infiltración.

La ventilación se lleva a cabo a través de superficies destinadas para ello intencionalmente, con un área mucho mayor que la de infiltración y por lo tanto, los cambios de aire como producto de la ventilación serán marcadamente mayores que los de la infiltración.

Por otra parte, debido a que la ventilación es diseñada de manera intencional, es posible tener itinerarios más o menos definidos, a diferencia de la infiltración, la cual se lleva a cabo durante las 24 horas. Para efecto de las simulaciones, a la ventilación se le asignó un itinerario en el cual, de las 7.00 a las 19.00 hrs., se produce la cantidad de cambios de aire indicados en la tabla 5.3.4 y en el resto del día no existe ventilación alguna. Las salidas arrojadas con éstas características se muestran en la gráfica 5.6.6 que se presenta más adelante.

Intercambio de aire con otros espacios

El intercambio de aire que se lleva a cabo entre el espacio en cuestión y los demás espacios adyacentes puede no ser muy importante cuando los espacios están bajo las mismas condiciones térmicas, ya que la diferencia de temperaturas entre ambos espacios será en realidad muy baja, sin embargo, se vuelve importante cuando el espacio adyacente, por alguna razón, tiene una temperatura marcadamente diferente.

Para el presente análisis, el espacio adyacente con el cual se consideró el intercambio de aire, no se encontraba bajo acondicionamiento artificial, por lo que las diferencias que puede tener con el espacio analizado son mínimas. De cualquier manera, en la gráfica 5.6.7 se presentan los resultados obtenidos con diferentes cambios de aire por hora, durante las 24 horas del día.

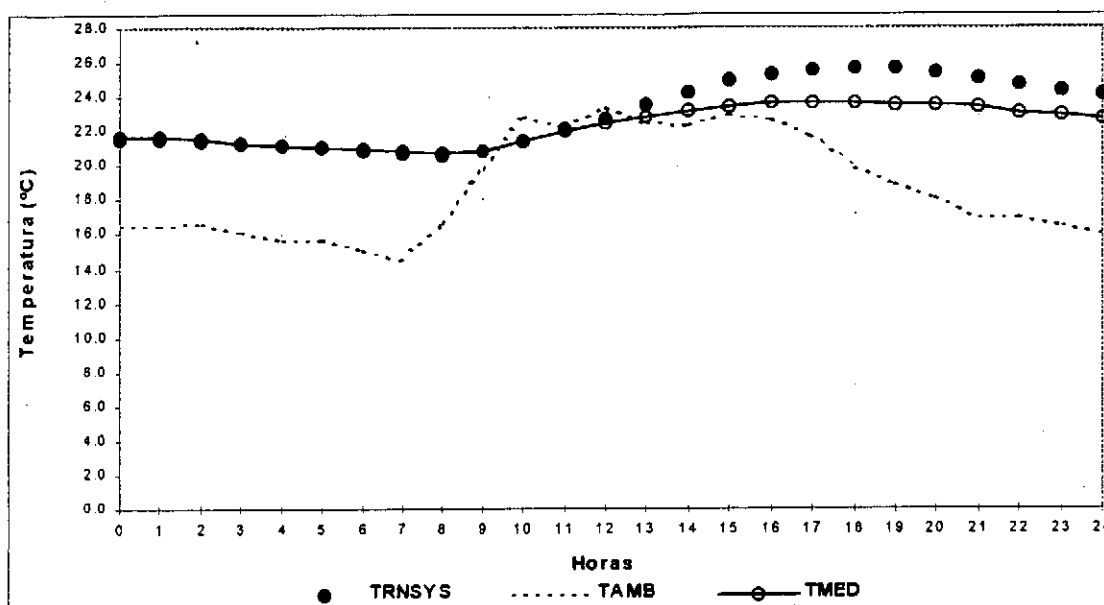
5.5 Período de Calentamiento

Una de las características de ambos programas es que en los primeros días de simulación muestran un período de acoplamiento en el cual van generando una “historia” del comportamiento térmico del edificio hasta llegar a estabilizarse. En el capítulo 2, al analizar la bibliografía existente, se encontró que en el caso de DOE-2.1E, Meldem y Winkelmann¹⁶ determinaron este período como un lapso de 7 días, al que llamaron “período de calentamiento” (“warm-up period”).

En el caso de TRNSYS existen estudios que afirman que es altamente dependiente de la temperatura estimada como inicial¹², pero dichos estudios contemplan un período de simulación muy limitado (entre 24 y 72 hrs). Esto se puede comprobar en la gráfica 5.5.1, donde se muestra la temperatura medida en el cubículo analizado del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Sonora, comparada con las salidas de TRNSYS 13.1 durante las primeras 24 horas. En este caso, a TRNSYS 13.1 se le asignó como temperatura inicial la misma que fue registrada en el monitoreo correspondiente*, por lo tanto, es de esperarse que este dato no afecte negativamente los resultados de la simulación.

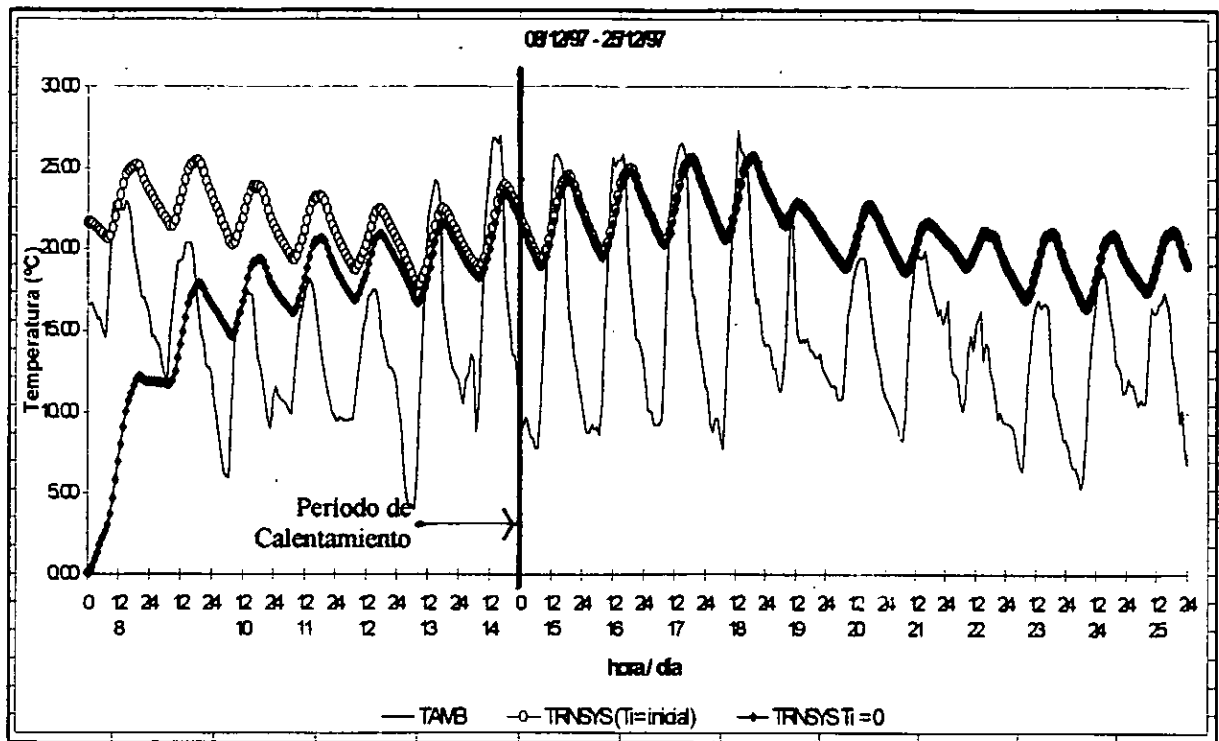
* Para más detalle ver el capítulo 7.

Como puede observarse en la gráfica 5.5.1, la simulación en TRNSYS 13.1 durante las primeras 12 horas puede ser muy alentadora, pero después de este período, el programa empieza a mostrar un mayor incremento en la temperatura interior que el que sucede en la realidad y no es posible predecir si su comportamiento posterior estará dado en base a la temperatura asignada inicialmente.



Gráfica 5.5.1 Comparación durante las primeras 24 hrs. de las salidas de TRNSYS 13.1 (TYPE 56) y los datos medidos en un laboratorio, en Hermosillo, Son.

Para observar si en TRNSYS existe también un período de calentamiento, se realizó un análisis con el caso de Hermosillo, indicando en una simulación, la temperatura inicial que había sido medida y en otra simulación paralela, la temperatura inicial igual a cero, de tal manera que se pudiera establecer, mediante la comparación de las salidas de ambas simulaciones y los datos medidos, la duración del período de calentamiento, o si realmente la temperatura asignada inicialmente influye directamente en las salidas del programa.



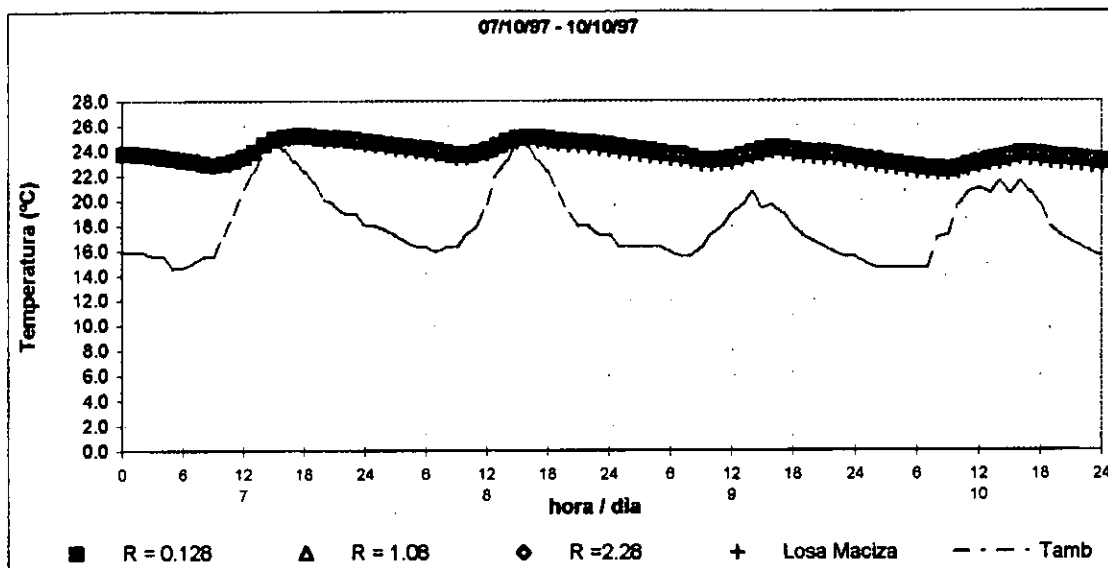
Gráfica 5.5.2 "Periodo de calentamiento" en TRNSYS 13.1= 7 días.

En la gráfica 5.5.2 se presentan los resultados de las simulaciones mencionadas. Se puede apreciar que después de 7 días, las salidas de las dos simulaciones son prácticamente las mismas, pudiéndose decir que este sería el periodo de calentamiento en TRNSYS 13.1, coincidentemente el mismo periodo que se estima en DOE-2.1E. Por esta razón, el análisis presentado a continuación, así como los resultados correspondientes al capítulo 7, se han realizado después de 7 días de simulación en los dos programas, es decir, que las comparaciones se inician a partir del día 15 de Diciembre.

5.6 Análisis de los Resultados

1. Resistencia del aire

En el caso del ejemplo utilizado para las simulaciones térmicas donde se analizó la resistencia del aire, sólo se contaba con cuatro días de datos horarios de clima para realizar las corridas, por lo cual, no ha sido posible considerar el periodo de calentamiento. No obstante, debido a que el valor indicado como temperatura inicial corresponde al valor medido en la habitación analizada, se han considerado válidas las salidas del modelo.



Gráfica 5.6.1 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores de Resistencia Térmica del aire en la losa.

En la gráfica 5.6.1 se muestran las salidas de TRNSYS 13.1 con los distintos valores de resistencia térmica del aire asignados. Aunque las gráficas de los 4 casos casi se sobreponen, en el cuarto día de comparación es posible ver una diferencia principalmente entre el caso en que se considera la losa maciza con respecto a los tres casos donde se contempla aire en el interior de la losa. El valor

máximo de esta diferencia llega a ser de apenas 0.53°C entre el caso de la losa maciza y los casos en que contiene aire, mientras que entre estos últimos, la diferencia máxima llega a ser de 0.08°C , siendo la principal diferencia entre los casos 2 y 3, ya que entre los casos 1 y 2 la diferencia es mínima. En la tabla 5.6.1 se pueden ver los valores de la temperatura estimada en los diferentes casos.

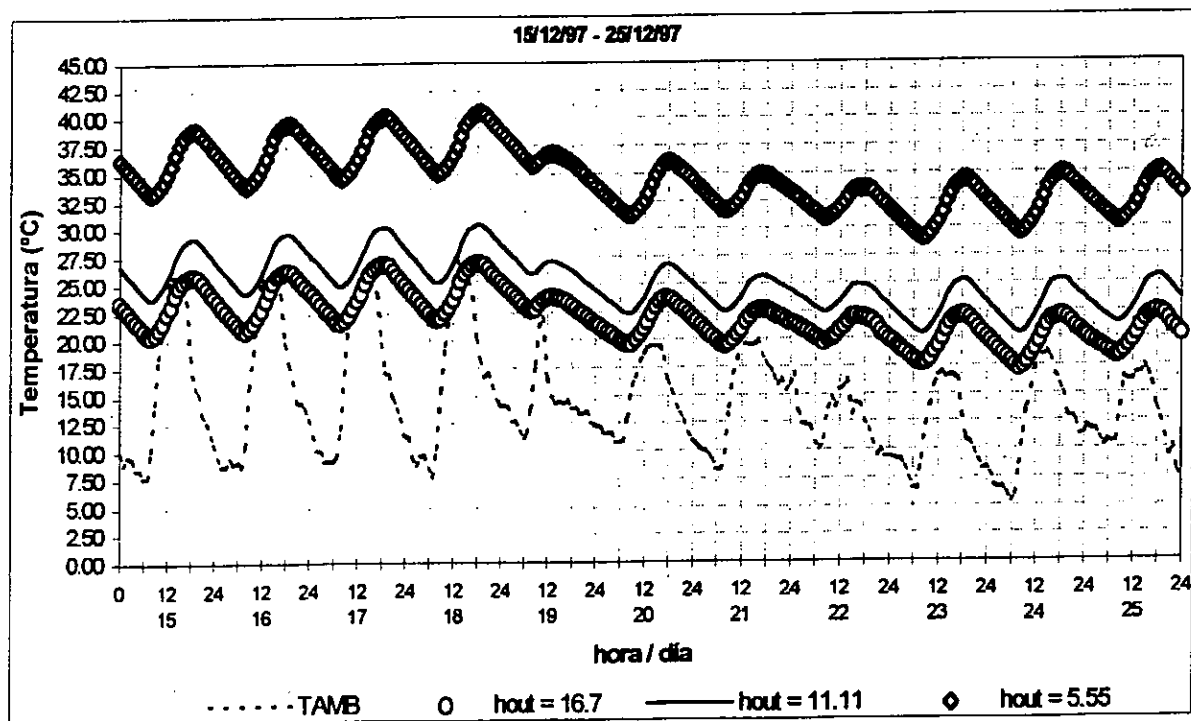
DIA	HORA	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	TAMB	DIA	HORA	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	TAMB
		R=0.0357	R=0.3351	R=0.635	Losa Maciza	Tamb			R=0.0357	R=0.3351	R=0.635	Losa Maciza	Tamb
7	0	23.76	23.76	23.76	23.76	15.90	9	0	24.45	24.44	24.41	24.03	17.20
	1	23.76	23.76	23.76	23.76	15.90		1	24.32	24.31	24.28	23.99	16.30
	2	23.68	23.68	23.68	23.68	15.90		2	24.20	24.19	24.15	23.78	16.30
	3	23.59	23.59	23.59	23.59	15.90		3	24.08	24.07	24.03	23.64	16.30
	4	23.46	23.46	23.46	23.46	15.90		4	23.97	23.96	23.91	23.53	16.30
	5	23.38	23.38	23.38	23.38	14.60		5	23.85	23.84	23.80	23.42	16.30
	6	23.24	23.24	23.24	23.24	14.60		6	23.74	23.73	23.69	23.32	15.90
	7	23.16	23.16	23.15	23.15	15.00		7	23.66	23.65	23.61	23.25	15.90
	8	22.97	22.97	22.96	23.00	15.90		8	23.46	23.47	23.43	23.08	15.90
	9	22.84	22.84	22.83	22.87	15.90		9	23.27	23.28	23.22	22.88	16.30
	10	22.86	22.86	22.95	23.00	17.20		10	23.24	23.23	23.19	22.88	17.20
	11	23.19	23.19	23.19	23.23	18.90		11	23.29	23.28	23.25	22.92	18.00
	12	23.46	23.47	23.48	23.52	21.00		12	23.40	23.39	23.38	23.04	18.90
	13	23.69	23.69	23.91	23.93	22.30		13	23.64	23.63	23.61	23.29	19.70
	14	24.50	24.50	24.52	24.52	24.00		14	23.82	23.81	23.80	23.47	20.60
	15	24.94	24.93	24.97	24.94	24.80		15	24.05	24.03	24.03	23.69	19.30
	16	25.08	25.07	25.12	25.05	24.00		16	24.28	24.25	24.28	23.90	19.70
	17	25.19	25.19	25.24	25.14	23.10		17	24.22	24.20	24.22	23.84	18.90
	18	25.21	25.21	25.27	25.13	22.30		18	24.09	24.08	24.10	23.71	18.00
	19	25.11	25.10	25.16	24.99	21.40		19	23.92	23.91	23.94	23.53	17.20
	20	25.04	25.04	25.08	24.99	20.10		20	23.83	23.82	23.84	23.43	16.70
	21	25.03	25.03	25.08	24.85	19.70		21	23.82	23.80	23.83	23.40	16.30
	22	24.99	24.99	25.01	24.79	18.90		22	23.75	23.74	23.76	23.33	15.90
	23	24.90	24.89	24.90	24.68	18.90		23	23.62	23.61	23.63	23.19	15.90
	24	24.78	24.78	24.78	24.53	18.00		24	23.46	23.47	23.46	23.05	15.90
8	1	24.67	24.67	24.66	24.40	18.00	10	1	23.35	23.33	23.35	22.91	15.00
	2	24.57	24.57	24.54	24.28	17.60		2	23.21	23.20	23.21	22.78	14.60
	3	24.46	24.46	24.43	24.17	17.20		3	23.08	23.08	23.07	22.65	14.60
	4	24.35	24.35	24.31	24.05	16.70		4	22.95	22.94	22.94	22.53	14.60
	5	24.24	24.24	24.19	23.94	16.30		5	22.82	22.81	22.82	22.41	14.60
	6	24.13	24.12	24.08	23.82	16.30		6	22.70	22.69	22.70	22.30	14.60
	7	24.05	24.04	23.99	23.74	15.90		7	22.62	22.61	22.62	22.23	14.60
	8	23.88	23.88	23.81	23.57	16.30		8	22.53	22.52	22.54	22.16	17.00
	9	23.68	23.67	23.62	23.39	16.30		9	22.46	22.46	22.49	22.12	17.20
	10	23.71	23.70	23.65	23.43	17.20		10	22.62	22.61	22.64	22.27	19.70
	11	23.64	23.63	23.79	23.98	18.00		11	22.67	22.66	22.69	22.52	20.60
	12	24.02	24.01	23.98	23.75	19.70		12	23.08	23.04	23.09	22.71	21.00
	13	24.38	24.37	24.34	24.11	22.30		13	23.24	23.22	23.28	22.89	20.60
	14	24.76	24.75	24.73	24.48	23.10		14	23.36	23.35	23.41	23.01	21.40
	15	25.00	24.99	24.96	24.71	24.80		15	23.55	23.53	23.60	23.18	20.60
	16	25.09	25.08	25.08	24.79	24.40		16	23.75	23.73	23.81	23.37	21.40
	17	25.05	25.05	25.05	24.74	23.10		17	23.75	23.73	23.81	23.34	20.60
	18	24.97	24.96	24.97	24.64	22.30		18	23.66	23.65	23.72	23.24	19.70
	19	24.84	24.83	24.84	24.50	20.60		19	23.51	23.50	23.57	23.07	18.00
	20	24.76	24.75	24.75	24.39	18.90		20	23.42	23.41	23.47	22.96	17.20
	21	24.73	24.72	24.72	24.35	18.00		21	23.41	23.39	23.45	22.95	16.70
	22	24.69	24.68	24.67	24.29	18.00		22	23.35	23.34	23.39	22.88	16.30
	23	24.58	24.57	24.55	24.17	17.20		23	23.24	23.22	23.28	22.73	15.90
	24	24.46	24.44	24.41	24.03	17.20		24	23.10	23.09	23.12	22.59	15.90

Tabla 5.6.1 Valores horarios de la temperatura estimada por TRNSYS 13.1 en los distintos casos de análisis de la Resistencia Térmica del Aire.

A partir de estas comparaciones se puede decir que el valor de la resistencia térmica de aire, en casos con climas templados, no influye drásticamente en los resultados de las simulaciones con TRNSYS 13.1, pero deben tenerse ciertas reservas para climas extremos, donde sin duda, existirán diferencias, sobre todo en periodos largos de simulaciones, pues en éste caso, es notorio que la diferencia entre las predicciones de los cuatro casos aumenta conforme avanza la simulación, aunque muy ligeramente.

2. Coeficiente exterior de transferencia de calor (h_o).

Al analizar el coeficiente de convección exterior se observó que el valor que éste puede adquirir, varia considerablemente dependiendo de la velocidad de viento. Para analizar las salidas se hicieron dos comparaciones, en la primera de ellas (gráfica 5.6.2), los valores del coeficiente de convección exterior (h_o) van desde 5.55 hasta 16.7 $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, y se puede observar lo siguiente:



Gráfica 5.6.2 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores del Coeficiente de Convección Exterior.

- El valor de h_o puede modificar drásticamente el valor de la temperatura interior del espacio.
- El efecto que se produce como resultado de las variaciones en el valor de h_o , afecta directamente el enfriamiento del espacio, incrementándose éste último conforme aumenta la valor del coeficiente y viceversa.
- El efecto de enfriamiento en la temperatura interior del espacio es menor para una misma diferencia entre valores altos de h_o , que para valores bajos, es decir, que cuando h_o varía de 5.55 a 11.11 W/m² °C, la diferencia de temperatura en el interior es de aproximadamente 10°C, mientras que cuando h_o varía de 11.11 a 16.7 W/m² °C, la diferencia de temperatura varía únicamente 3°C en promedio.

Bajo estas observaciones, se puede decir que se debe tener mucho cuidado al indicar el valor del coeficiente de convección exterior para lograr una adecuada simulación térmica, pues de ello depende fuertemente la temperatura interior.

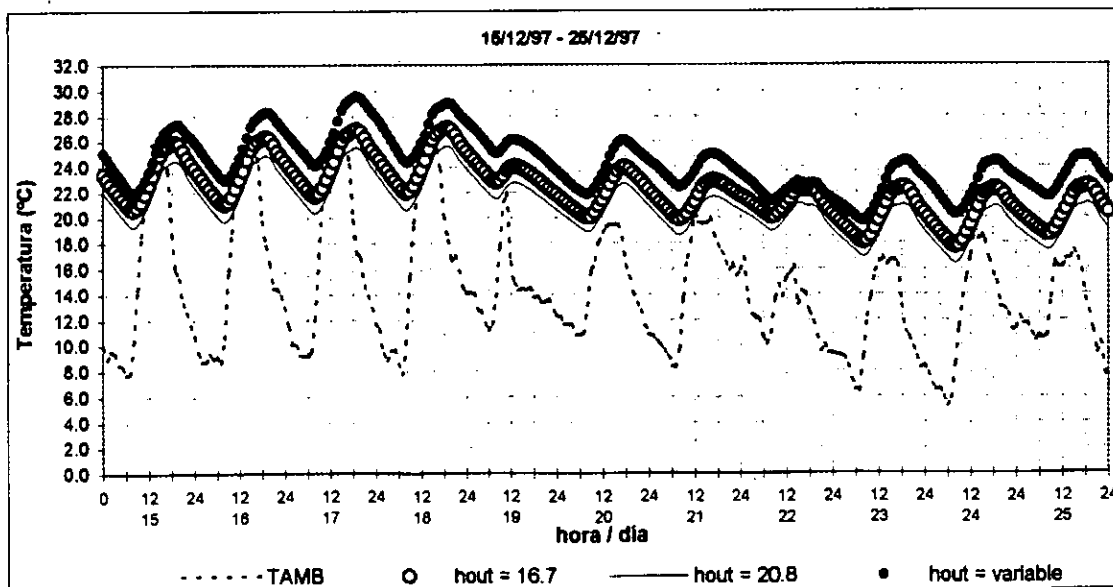
Para poder determinar más claramente la importancia de éste coeficiente, se realizó la comparación con los casos 5, 6 y 7 de la tabla 5.3.3, donde se contemplan otras características de h_o como se ha indicado. En la gráfica 5.6.3 se muestran las salidas de los casos mencionados, siendo visible lo siguiente:

- La diferencia entre las salidas cuando h_o varía de 16.7 a 20.8 W/m² °C, se mantiene muy constante durante toda la simulación, oscilando entre 1 y 1.5°C todo el tiempo, independientemente de que se trate de días extremosos o de días templados.

- Si se comparan las salidas cuando h_o varía con el viento y cuando es igual a $20.8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, las diferencias aumentan considerablemente, siendo mayor la temperatura cuando h_o varía con el viento hasta en 4.44°C para los días más extremos, disminuyendo hasta 1.62°C en los días templados, específicamente en aquellos cuando se presentan mayores velocidades de viento.

Cabe resaltar que en todos los casos en que se consideró constante el valor de h_o , las diferencias entre las predicciones respectivas se mantuvieron muy constantes a lo largo de todo el periodo de análisis, siendo el caso de h_o dependiente del viento el único en el que las diferencias varían constantemente.

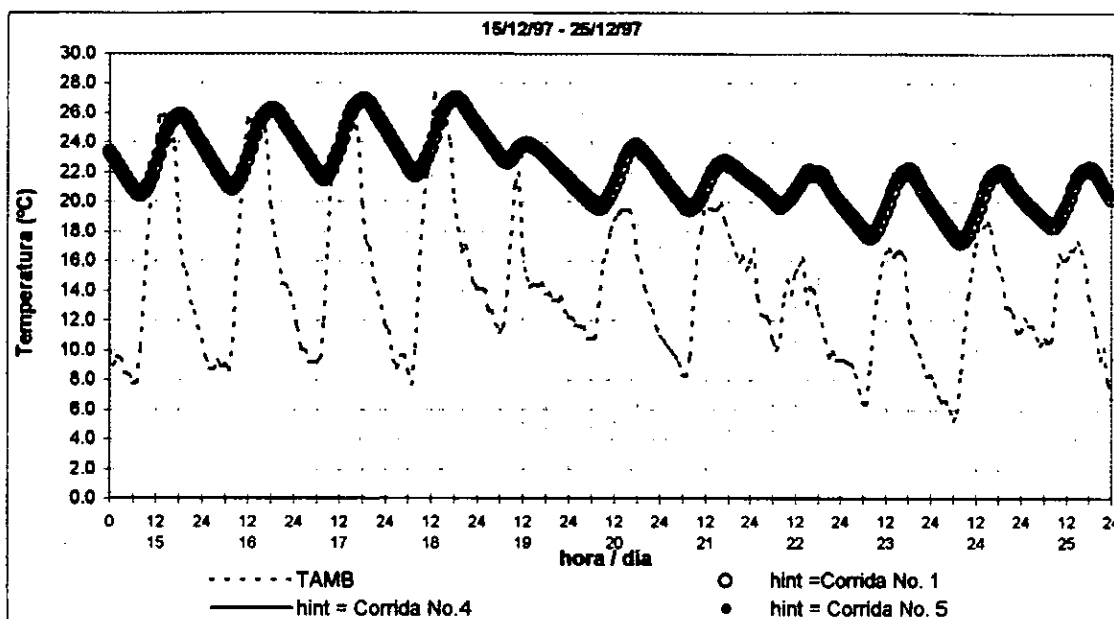
Por lo anterior, se concluye que es muy importante asignar un valor adecuado al coeficiente de convección exterior para lograr buenos resultados, el cual puede ser aproximado por la velocidad promedio del viento en el lugar de interés.



Gráfica 5.6.3 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores del Coeficiente de Convección Exterior, así como valores de acuerdo a la velocidad horaria del viento.

3. Coeficiente interior de transferencia por convección (h_i).

En otro análisis se compararon las salidas del programa habiendo modificado el valor del coeficiente de convección interior y manteniendo el coeficiente exterior constante, de acuerdo a los casos 1, 4 y 5 presentados en la tabla 5.3.3. Al graficar las salidas de dichas simulaciones (gráfica 5.6.4) se puede observar que se sobreponen unas a otras, evidenciando que el efecto causado por la variación del coeficiente interior es mínimo.



Gráfica 5.6.4 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores del Coeficiente de Convección Interior.

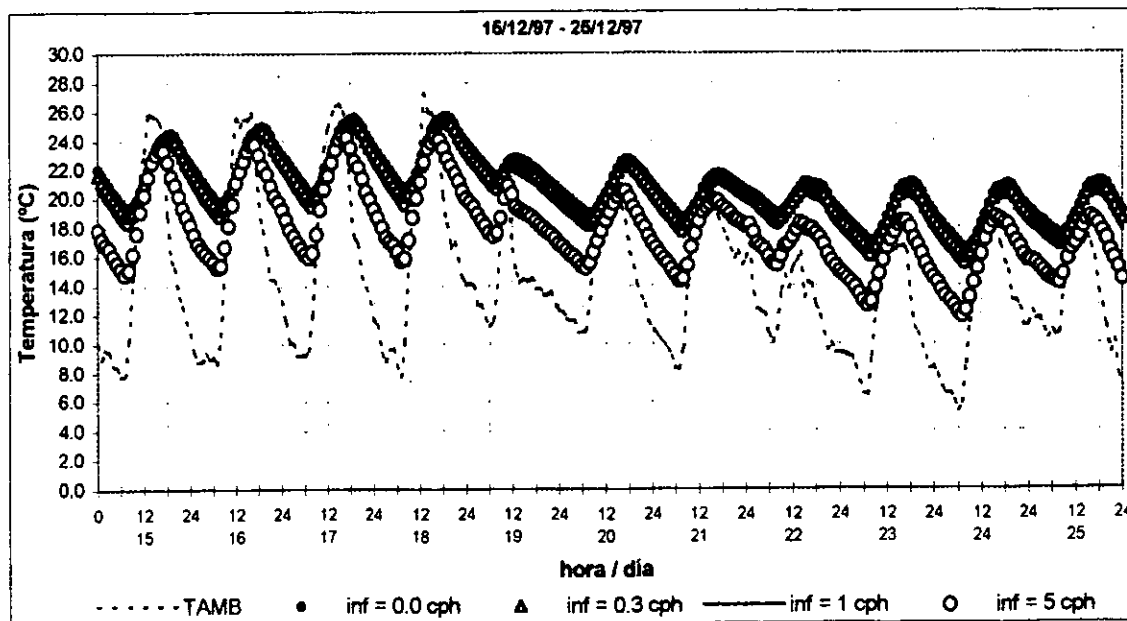
Las observaciones que se pueden mencionar al respecto son las siguientes:

- En el interior, el valor de h_i no cambia drásticamente debido a que la influencia del viento es mínima.
- El efecto que produce en la temperatura interior una variación moderada del coeficiente de convección interior es prácticamente nulo.

Si se analiza de manera global el impacto que puede tener el valor del coeficiente de convección, se puede determinar que se debe tener mucho cuidado al indicar el valor de h_o , pues éste puede influir fuertemente en los resultados, mientras que al asignar el valor de h_i , puede existir un margen de error considerable sin que afecte de manera visible las salidas del programa, excepto cuando existan sistemas mecánicos de calefacción o enfriamiento.

4. Infiltración

Debido a que la temperatura del exterior es inferior a la temperatura interior la mayor parte del día, entre más cambios de aire tenga el espacio por infiltración del aire exterior, la temperatura será menor. En la gráfica 5.6.5 se pueden ver los efectos que tiene la infiltración en el espacio determinado, a partir de la cual se puede distinguir lo siguiente:



Gráfica 5.6.5 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores de Infiltración.

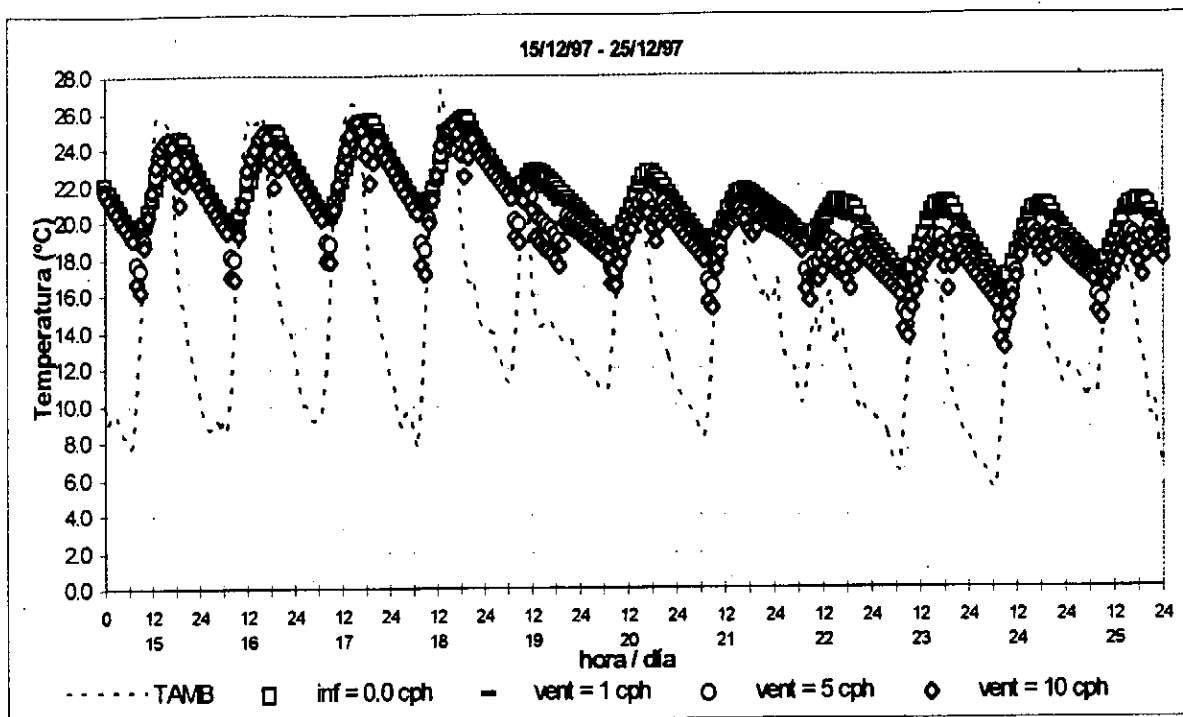
- Para pocos cambios de aire por infiltración, la variación de la temperatura interior es mínima (entre 0 y 0.3 cambio de aire, la diferencia de temperatura oscila entre 0.12°C y 0.49°C).

- Cuando los cambios de aire se incrementan, las variaciones en la temperatura son considerablemente fuertes (al cambiar de 1 a 5 cambios de aire, la diferencia de temperatura va desde 0.03°C hasta 3.55°C).
- Puede observarse también, que debido a que la infiltración es uniforme durante las 24 hrs., la diferencia entre las temperaturas es casi uniforme a lo largo de todo el periodo de simulación.

5. Ventilación

A diferencia de la infiltración, la ventilación se lleva a cabo únicamente durante doce horas (ver tabla 5.3.4), lo cual provoca diferencias importantes entre ambas. Del análisis de la gráfica 5.6.5 se puede mencionar lo siguiente:

- Durante las doce horas en que existe ventilación se observan diferencias importantes en la temperatura interior, sin embargo, estas diferencias tienden a desaparecer cuando la ventilación se elimina, estabilizándose nuevamente la temperatura antes de reiniciar el siguiente periodo de ventilación.
- Las diferencias en la temperatura son más pronunciadas durante los días en que se presenta una oscilación fuerte en la temperatura exterior (más de 15°C).
- Cuando la oscilación de la temperatura exterior es relativamente baja (menos de 15°C), prácticamente no existen diferencias en la temperatura interior, aún entre los casos más diferentes (0 a 10 cambios de aire).
- La diferencia de temperatura entre 0 y 10 cambios de aire es importante durante el día (hasta 4°C), cuando se alcanzan las temperaturas más altas en el exterior, de tal manera que puede influir para el dimensionamiento de un equipo de aire acondicionado.



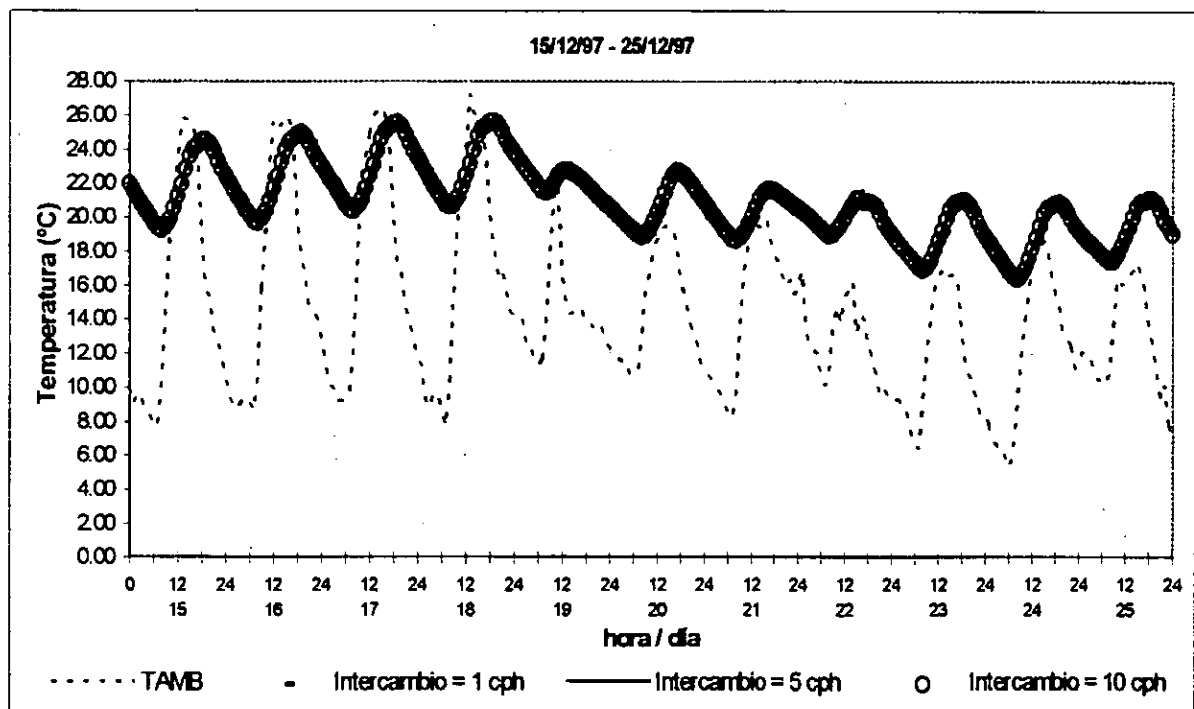
Gráfica 5.6.6 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores de ventilación.

Puede observarse claramente que el mantener el espacio durante un lapso de tiempo sin ventilación, permite que la temperatura interior se vuelva a estabilizar, pero se pueden lograr efectos notables para reducir la temperatura interior durante los intervalos en los que la temperatura exterior es más elevada, lo que puede significar un importante ahorro de energía. No obstante, nuevamente cabe resaltar que estas observaciones aplican para el clima con el cual se simuló el espacio, pero para climas con otras características los efectos pueden ser diferentes.

6. Intercambio de aire con espacios adyacentes

Como puede apreciarse en la gráfica 5.6.7, la temperatura es prácticamente la misma para cualquier caso, incluso cuando se contemplan 10 cambios de aire por hora, concluyendo rápidamente que en

este sentido se puede tener un amplio margen de error con respecto a la realidad sin representar un fuerte impacto en los resultados. De cualquier manera, conviene recordar que los espacios adyacentes en este caso se encontraban bajo las mismas condiciones térmicas que el espacio analizado, por lo que su temperatura era prácticamente la misma y era de esperarse que el efecto fuera mínimo, pero para espacios adyacentes con condiciones térmicas diferentes, es obvio que el efecto será diferente. En casos donde los espacios adyacentes estén bajo acondicionamiento artificial, lo más probable es que se encuentren aislados del espacio en cuestión, por lo que no habrá intercambio de aire definido como tal, pero si existen elementos que bajen o incrementen la temperatura de dichos espacios de manera drástica y existen amplias áreas de intercambio de aire, se debe tener mucho cuidado con el valor asignado a éste parámetro.



Gráfica 5.6.7 Salidas de TRNSYS 13.1 considerando diferentes valores intercambio de aire con los espacios adyacentes.

5.7 Conclusiones

Como resultado del análisis de sensibilidad realizado con TRNSYS 13.1, se pueden determinar las siguientes conclusiones:

1. Existe un "período de calentamiento" en TRNSYS, después del cual las salidas del programa se estabilizan y pueden ser consideradas válidas. Dicho período se estima como un lapso de 7 días.
2. El valor que adquiere la resistencia térmica del aire, dentro de los rangos establecidos por la ASHRAE, para elementos constructivos con aire en su interior, afecta muy ligeramente las salidas de TRNSYS 13.1 en climas templados, pero sí existe una diferencia visible entre los casos con elementos macizos y aquellos que contienen aire en su interior.
3. El valor del coeficiente de convección exterior impacta muy fuertemente el efecto de enfriamiento de la envolvente del edificio, siendo muy visible en la temperatura interior de los espacios estimada por los programas.
4. El efecto de enfriamiento en la temperatura interior del espacio, es menor para una misma diferencia entre valores altos del coeficiente de convección exterior, que para valores bajos.
5. El valor del coeficiente de convección interior, para diferentes tipos de superficies, no cambia drásticamente, debido a que la fuerza del viento en el interior, si existe, es muy baja. El efecto causado por estas pequeñas diferencias es prácticamente nulo en la temperatura del aire del espacio.

6. Para valores menores a 1 cambio de aire por hora debido a la infiltración, la temperatura del interior del espacio no se ve afectada notablemente, pero si se asignan valores altos (5 cambios de aire por hora, por ejemplo), la oscilación de la temperatura interior estimada se incrementa en gran medida, influenciada directamente por la temperatura exterior.
7. Al asignar la ventilación, es posible determinar itinerarios de acuerdo a la conveniencia del usuario, los cuales afectan directamente el efecto enfriamiento y/o calentamiento del espacio.
8. Durante el período de ventilación, si la temperatura del aire exterior es menor a la interior, se observa un enfriamiento importante del espacio, principalmente cuando existen muchos cambios de aire por hora (entre 5 y 10), pero durante el período en que se suspende la ventilación, la temperatura del interior del espacio vuelve a estabilizarse.
9. Cuando se asignan pocos cambios de aire por hora a la ventilación (menos de 5), el efecto de enfriamiento durante el período asignado es apenas notable.
10. Cuando los espacios adyacentes se encuentran bajo las mismas condiciones térmicas, el intercambio de aire entre ellos, por elevado que sea, no es notable.

Capítulo 6

1^{er} ANÁLISIS EXPERIMENTAL: TRNSYS v13.1

Con el propósito de evaluar la precisión que pueden tener los programas de simulación térmica al considerar las características constructivas y climatológicas de la República Mexicana, en este capítulo se ha realizado una comparación de las salidas del programa TRNSYS 13.1, con los datos de un monitoreo en una habitación de un departamento en la Ciudad de México, D.F.

En este primer análisis, se ha utilizado solamente el programa TRNSYS 13.1, por las razones mencionadas en el capítulo anterior, pero se ha contado con otro caso en el cual si se han empleado los dos modelos (TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E), mismo que se detalla en el siguiente capítulo.

Con respecto al análisis de TRNSYS 13.1, en la República Mexicana se tiene como antecedente el trabajo realizado por Fernández A.¹⁴ en el que se comparan, de manera empírica, dos modalidades del programa: el método sencillo (TYPE 12) y el método detallado (TYPE 56). Como se indicó en el capítulo 2, en el análisis realizado por Fernández¹⁴ se concluyó que el TYPE 12 no presenta resultados precisos en los datos horarios, pero a nivel de medias puede ser utilizado. Por su parte, el TYPE 56 mostraba variaciones térmicas más acordes con la realidad, pero con un desplazamiento de aproximadamente 2°C por debajo de las temperaturas reales, en las condiciones ambientales más estables, y de hasta 7°C por debajo de la realidad cuando las variaciones de la temperatura exterior eran fuertes en un período de 24 horas.

Tomando como referencia estos resultados, en este capítulo se ha realizado nuevamente una comparación de dos modalidades de simulación de TRNSYS 13.1, considerando, en primer término, el TYPE 56, que por permitir una descripción detallada del edificio, se ha utilizado de dos maneras distintas:

- a) utilizando la descripción de todo el departamento, y
- b) describiendo únicamente la habitación de estudio.

En segundo lugar, se ha empleado el TYPE 19, que permite simular solamente un espacio dentro de todo el edificio, describiéndolo de manera más o menos detallada.

6.1 Metodología

El presente análisis se llevó a cabo de acuerdo con la metodología de *Validez Empírica* definida por Judkoff y Neymark¹ como “aquella en la cual los resultados calculados por un programa, son comparados con los datos de un monitoreo realizado en una estructura real”, tomando en cuenta que se disponía de los suficientes elementos para llevarla cabo con cierta precisión.

La ventaja que presenta esta prueba, es que las salidas de los programas se pueden comparar con los datos reales, permitiendo determinar si los programas son lo suficientemente precisos para su utilización, sin embargo, presenta algunos inconvenientes, por ejemplo, que el monitoreo debe ser muy cuidadoso, con equipo perfectamente calibrado y bajo condiciones muy controladas, pues

cualquier variable que no se tenga contemplada y no se tome en cuenta en las entradas del programa, podrá generar errores que necesariamente anularán la validez del análisis.

Bajo estas circunstancias, el análisis presentado aquí sólo se ha realizado mediante las comparaciones de la temperatura del aire interior del espacio, pues es el parámetro más fácilmente medible y controlable, aunque es conveniente, en estudios posteriores, realizar comparaciones de los diferentes tipos de salidas que permiten los programas, para lo cual será necesario una gran cantidad de equipo y medidas de precaución que permitan llevar a cabo un monitoreo confiable.

6.2 Descripción del Caso de Estudio

El espacio que se analizó es la recámara principal de un departamento del último piso de un edificio de 10 niveles, localizado en la Unidad Habitacional Latinoamericana, en la zona de Copilco, en el D.F. En las figuras 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3 se puede ver la disposición general del edificio y del departamento simulado.

Cabe mencionar que el departamento de estudio se encontraba en uso durante el período del monitoreo, teniendo sus ocupantes diferentes horarios y actividades dentro del mismo, sin embargo, en base a algunas encuestas realizadas se determinaron horarios y espacios en los cuales se estimó la ubicación de los ocupantes para efecto del análisis.

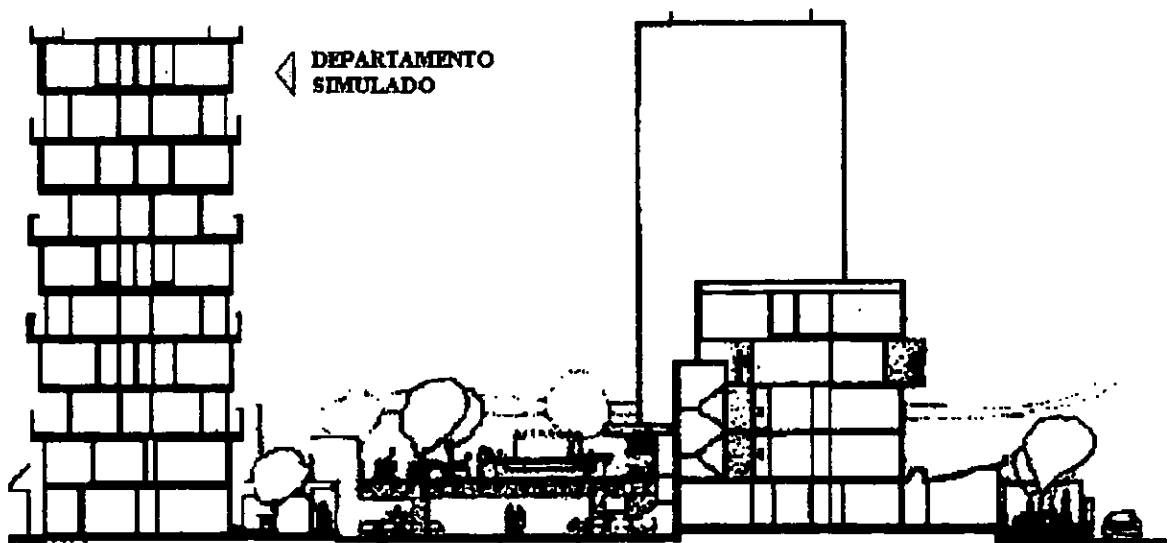


Figura 6.2.1 Corte de conjunto con un edificio de 10 niveles en la Unidad Habitacional Latinoamericana.

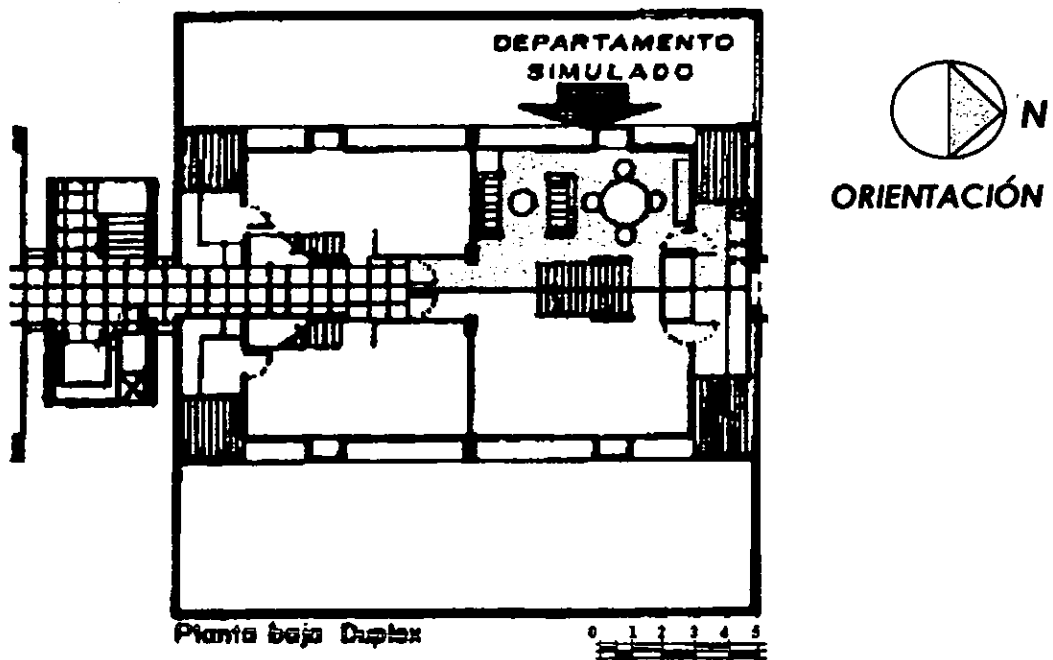


Figura 6.2.2 Planta baja del departamento simulado.

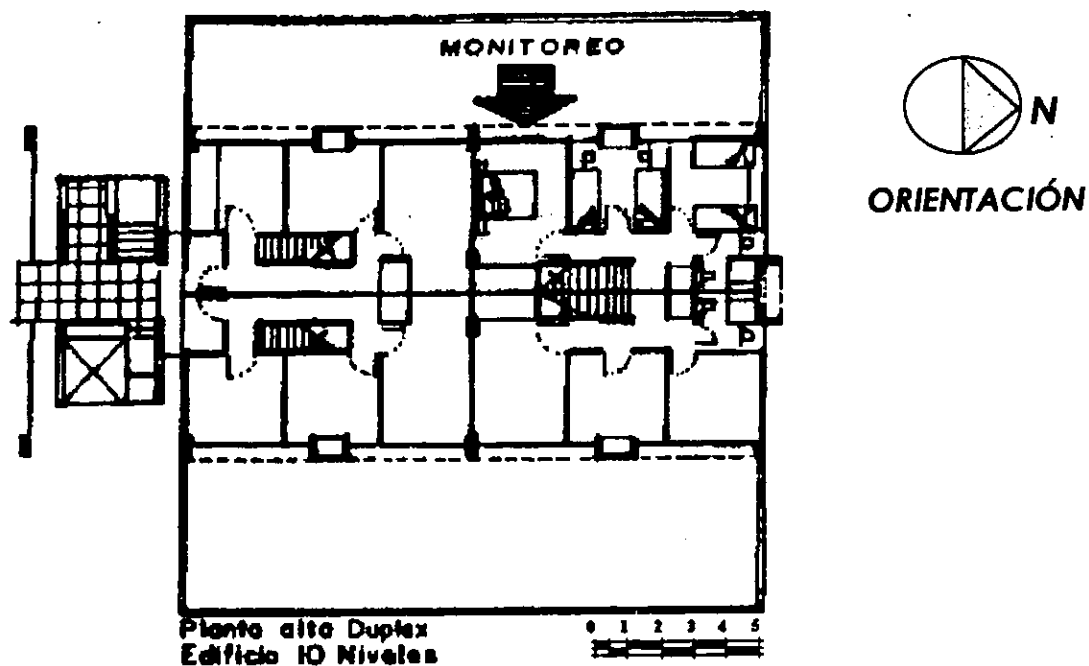


Figura 6.2.3 Planta alta del departamento simulado.

6.2.1 Descripción del espacio

La habitación consiste en un espacio de 12 m^2 con una altura de 2.15m, orientado al poniente, con una ventana de 0.96 m^2 (fig. 6.2.4). Los muros que colindan con los otros departamentos así como los exteriores son de tabique hueco aparente.

6.2.2 Características Constructivas del Espacio

Los muros interiores son de tablarroca. Tanto los entrepisos como el techo son de vigueta y bovedilla (figuras 6.2.5 y 6.2.6). Las propiedades termofísicas de los materiales constructivos fueron tomadas principalmente de la NOM-008⁴ y se presentan en la tabla 6.2.1.

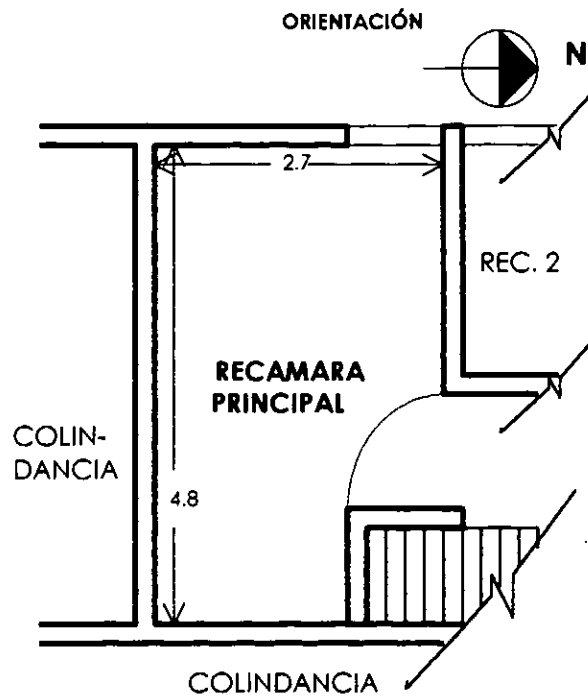


Figura 6.2.4 Planta arquitectónica de la habitación monitoreada.

DESCRIPCIÓN	CONDUCTIVIDAD (W/ m °C)	CALOR ESPECÍFICO (kJ/kg °C)	DENSIDAD (kg/m ³)
Tabique	0.998	0.829	2050
Concreto	1.740	0.840	2300
Tablaroca	0.155	0.840	950
Bovedilla	0.180	0.878	2050
Loseta	1.750	0.837	1400
Aplanado	0.720	0.900	2890
Puerta de Madera	0.140	1.22	1600
Tezontle	0.580	1.000	1600
Mortero	0.721	0.900	1890
Ladrillo	1.282	0.829	1800
Aire-Muros	Resistencia = 0.331* (m ² °C/W)		
Aire-Losa	Resistencia = 0.680* (m ² °C/W)		

Tabla 6.2.1 Propiedades termofísicas de los materiales utilizados en el edificio analizado.

* El valor de la resistencia del aire se propuso de acuerdo a las recomendaciones del ASHRAE⁹.

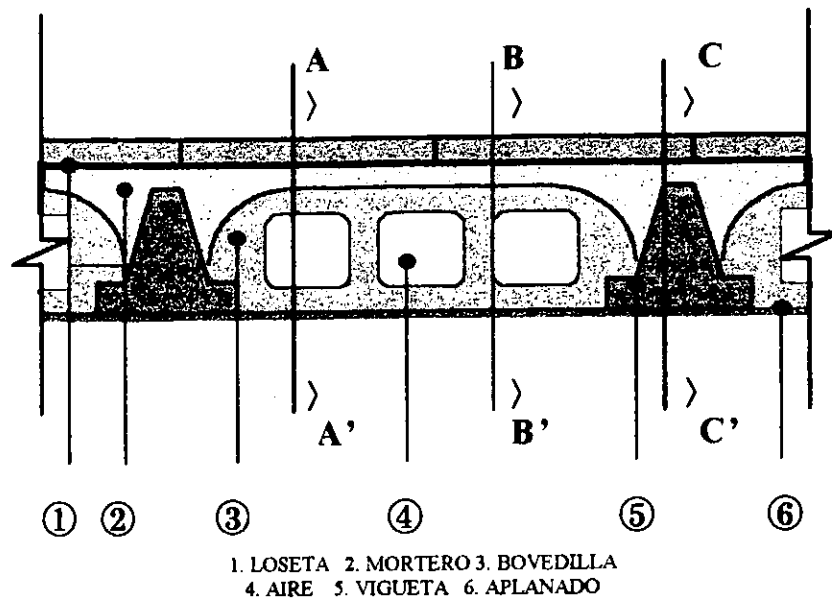


Figura 6.2.5 Composición del entrepiso de vigueta y bovedilla.

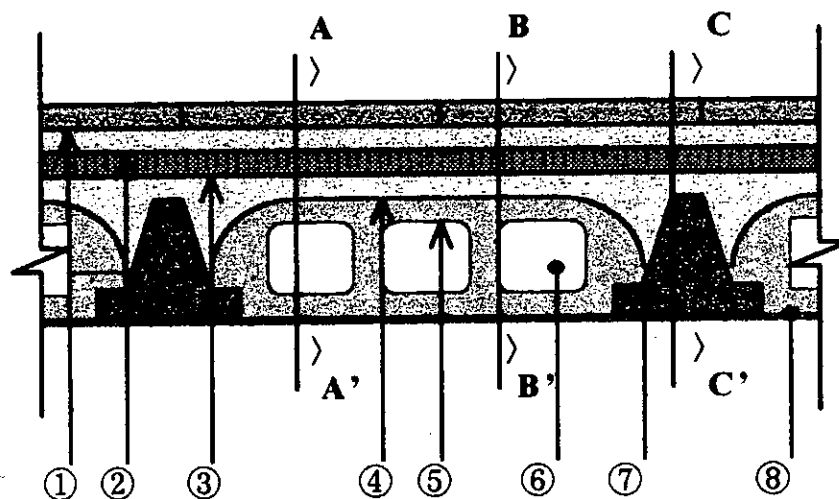


Figura 6.2.6 Composición del techo de vigueta y bovedilla.

6.2.3 Algunas consideraciones importantes

Para determinar los alcances y la validez de este estudio, a continuación se describen algunas consideraciones que especifican las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el análisis.

- a) **Datos Meteorológicos.** Los datos de clima no fueron monitoreados *in situ*, sino en el Instituto de Geofísica de la UNAM, por lo que es necesario hacer la siguiente observación: La estación meteorológica del Instituto de Geofísica de la UNAM, se encuentra inmersa en una vasta zona de áreas verdes (Ciudad Universitaria). En un estudio reciente¹⁰, se ha determinado que la predominancia de área verde sobre área construida (edificios y pavimentos), hace que esta sección de la ciudad sea una zona fresca que actúa como un sumidero de calor, refrescando una franja de terreno a su alrededor de aproximadamente un kilómetro de ancho, hasta cuyo límite se consideran válidos los registros de dicho observatorio. El edificio de estudio se encuentra ubicado dentro de estos límites.
- b) **El Entorno.** A diferencia de la Zona Universitaria, en la Unidad Habitacional Latinoamericana, donde se desplanta el edificio, predomina el área construida (superficies empedradas y planchas de concreto) sobre las áreas verdes, ocupando un 75% y 25% del área respectivamente, lo que hace suponer que la humedad del ambiente será ligeramente menor que la registrada en el Observatorio de Geofísica, y teniendo un albedo o reflexión entre el 17 y 27% ¹⁰, la radiación infrarroja de las superficies construidas puede incrementar levemente la temperatura exterior con respecto a los mismos parámetros.
- c) **El monitoreo.** El espacio analizado se encontraba ocupado durante el periodo del monitoreo, por lo cual, es necesario considerar las ganancias de calor producidas por la gente. En TRNSYS 13.1, las ganancias internas de calor se pueden determinar con horarios de uso, pero no quiere decir que en la realidad las personas sean estrictas con dichos horarios.

- d) **Otras ganancias de calor.** El número de lámparas y aparatos eléctricos se definieron conforme a una encuesta que se aplicó a los usuarios, pero los horarios para su uso fueron estimados de acuerdo a las actividades cotidianas de cada ocupante.

En base a lo anterior, se puede decir que es prácticamente imposible tener un control riguroso de todas las variables que intervienen en el comportamiento térmico del espacio, y seguramente esto va a producir errores en los resultados, sin embargo, es importante tener en cuenta que en la realidad, las simulaciones se hacen para edificios bajo las mismas consideraciones y además, las variables climáticas son hipotéticas, lo cual le da mayor validez al presente estudio.

6.2.4 Datos Climatológicos

Como ya se mencionó, los datos ambientales fueron registrados por el Instituto de Geofísica de la UNAM. Cabe mencionar que aún cuando los datos se recopilaban durante los mismos siete días en que se llevó a cabo el monitoreo de la habitación (del 6 al 13 de Octubre de 1997), se determinó que sólo cuatro días de esa semana presentaban la información con suficiente claridad y confiabilidad para poder emplearlos en las simulaciones.

En la figura 6.2.7 se presentan las gráficas de los parámetros climáticos obtenidos del Instituto de Geofísica de la UNAM, que fueron utilizados para las simulaciones.

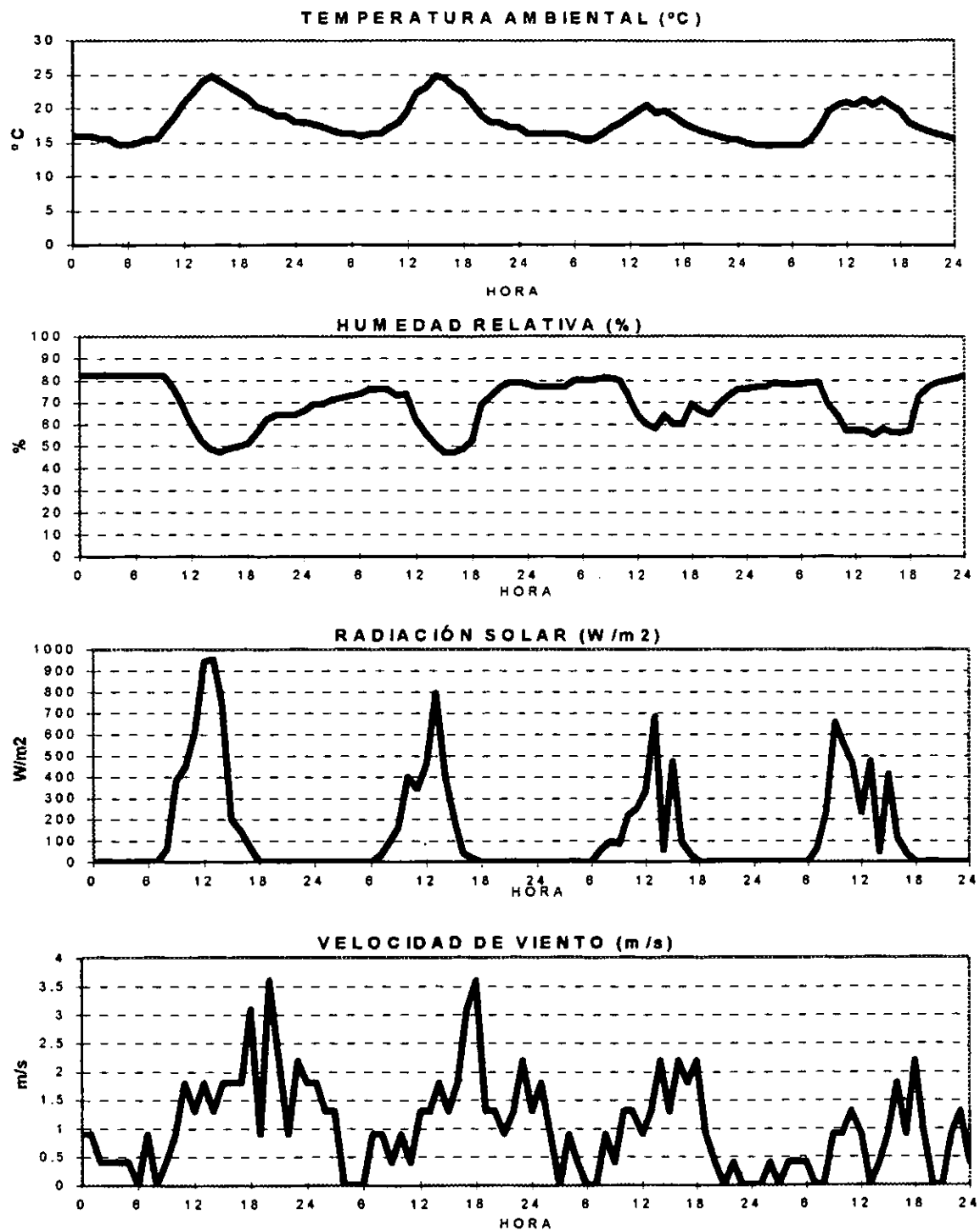


Fig. 6.2.7. Datos climáticos utilizados para las simulaciones. Los registros fueron hechos en el Instituto de Geofísica de la UNAM, del 7 al 10 de Octubre de 1997.

6.2.5 Condiciones del Monitoreo Interior

La habitación se monitoreó durante una semana con un termohigrógrafo marca Lambrecht KG Göttingen, modelo 252, el cual fue previamente calibrado por el personal del Instituto de Geofísica de la UNAM. De manera paralela, se tomaron periódicamente registros con un psicrómetro para corroborar los datos del termohigrógrafo. Durante el periodo del monitoreo, se pudo observar una diferencia prácticamente constante entre los registros de los dos aparatos, por lo cual, los datos del termohigrógrafo se ajustaron en base a los datos del psicrómetro, presumiblemente más exacto.

6.3 Simulaciones en TRNSYS 13.1

Se utilizaron dos modos de operación del TRNSYS 13.1 para la simulación del departamento: el TYPE 56 y el TYPE 19. El primero de ellos permitió determinar con mayor precisión algunas características como horarios de uso así como las características de algunos elementos.

6.3.1 Definición del Edificio

Tanto en el TYPE 19 como en el TYPE 56, TRNSYS 13.1 considera a los muros y losas como elementos térmicamente homogéneos, con las capas paralelas entre sí. Esto representó una dificultad para describir el techo y entrepiso, pues como se puede ver en las figs. 6.3.5 y 6.3.6, las capas en la sección A-A' son diferentes de las que se pueden observar en las secciones B-B' o C-C' y debido a la forma de las bovedillas y de las viguetas, no es conveniente describir a la losa como un solo elemento compuesto de capas homogéneas.

Para poder describir la losa y los entrepisos, se obtuvo de manera aproximada el porcentaje del área que comprenden los orificios de las bovedillas y el resto se consideró como si las bovedillas fueran macizas, de tal manera que las simulaciones se llevaron a cabo suponiendo dos tipos de losa y entrepiso en cada espacio. De acuerdo a las dimensiones de las bovedillas, se calculó que el área que comprende aire dentro de la losa es aproximadamente el 48%, mientras que el 62% restante se supuso como losa maciza. Esta suposición sólo fue posible aplicarla en el TYPE 56, ya que en el TYPE 19 sólo es posible indicar una losa a la vez, por lo que en su caso fue necesario describir la losa como si fuera uniforme en su composición, conteniendo la capa antes mencionada.

Los materiales constructivos utilizados en la habitación simulada se describen en la tabla 6.2.1, así como sus propiedades termo-físicas.

Las características ópticas de las ventanas se describen aparte de los materiales constructivos en ambos types. Las propiedades de las ventanas descritas en la simulación se presentan en la tabla 6.3.1.

MATERIAL	ABSORTANCIA α	REFLECTANCIA ρ	TRANSMITANCIA τ
VIDRIO CLARO DE 5mm	0.12	0.08	0.8

Tabla 6.3.1 Propiedades ópticas de las ventanas

6.3.2 Ganancias Internas

Como se ha mencionado anteriormente, el departamento se encontraba ocupado durante el monitoreo, por lo que las ganancias de calor generadas por las personas, por iluminación y por el uso de

aparatos eléctricos en el interior del departamento juegan un papel importante en la simulación. En la tabla 6.3.2, se muestran los tipos de ganancias que se describieron, la cantidad de calor que aportan y sus horarios, únicamente para la habitación monitoreada. Es conveniente recalcar que en la realidad los itinerarios no se cumplen estrictamente como se estipuló en la simulación.

6.3.3 Ventilación e Infiltración

Como el único elemento donde se puede presentar infiltración en la habitación analizada es en la ventana y ésta es muy pequeña, para la habitación estudiada se determinaron 0.3 cambios de aire por hora, la cual se lleva a cabo durante las 24 hrs., como se ha mencionado anteriormente.

Con respecto a la ventilación, en el TYPE 56 es posible especificar itinerarios, aunque el número de cambios de aire no esté determinado por la velocidad y/o dirección del viento, sino por el valor especificado. En este caso se asignaron 0.5 cambios de aire por hora con el itinerario que se muestra en la tabla 6.3.2.

CONCEPTO	No.	ITINERARIO	CARGA TÉRMICA
PERSONAS	2	1:00 – 7:00 20:00 – 24:00	70 W
LÁMPARAS	2	6:00 – 7:00 19:00 – 22:00	100W
VENTILACIÓN		7:00 – 19:00 (TYPE 56)	

Tabla 6.3.2 Itinerarios y carga térmica de algunos elementos de la habitación simulada.

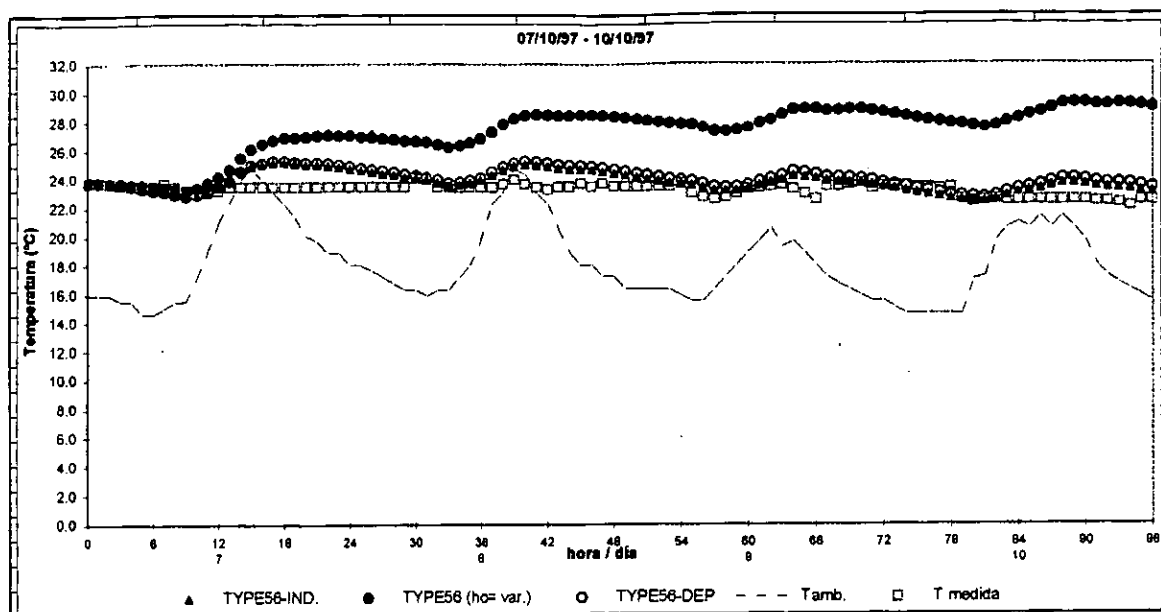
El TYPE 19 por su parte, no permite asignar itinerarios para la ventilación, sino que esta debe ser determinada como un valor constante, por lo cual se puede considerar como si su valor fuera sumado

al de la infiltración. Como bajo esta circunstancia se afectaría muy drásticamente la simulación, en este caso sólo se especificó la infiltración.

6.4 Análisis de Resultados

Independientemente de la modalidad que se utilice para la simulación térmica de edificios en TRNSYS, es necesario especificar la temperatura inicial del aire del (los) espacio(s), a partir de la cual comienza los cálculos horarios. En este caso, se determinó como temperatura inicial la registrada en el monitoreo a las 0 hrs. del primer día.

Para realizar las comparaciones con el TYPE 56 y el TYPE 19, antes se compararon tres casos diferentes con el TYPE 56. En primer término, se asignó el valor del coeficiente de convección exterior de acuerdo a la velocidad del viento, con el propósito de observar cuál de las simulaciones se apega más al comportamiento térmico medido en la habitación, pues como se observó en el capítulo anterior, en este sentido existen diferencias entre las salidas cuando el valor de h_o es constante y cuando es variable. En otro caso se asignó el valor de h_o para una velocidad de viento de 4m/s ($h_o = 20.8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) y en un tercer caso, se simuló solamente la habitación de estudio, suponiendo los muros colindantes con otros espacios o departamentos como adiabáticos. Este último caso se simuló para ver si existía alguna diferencia con respecto a los otros dos casos, donde se simuló todo el departamento, pues de ser así, habría que considerarlo para las comparaciones con el TYPE 19, donde sólo se puede simular un espacio.



Gráfica 6.4.1 Comparación de la temperatura estimada por TRNSYS 13.1-TYPE 56 y la medida en la habitación.

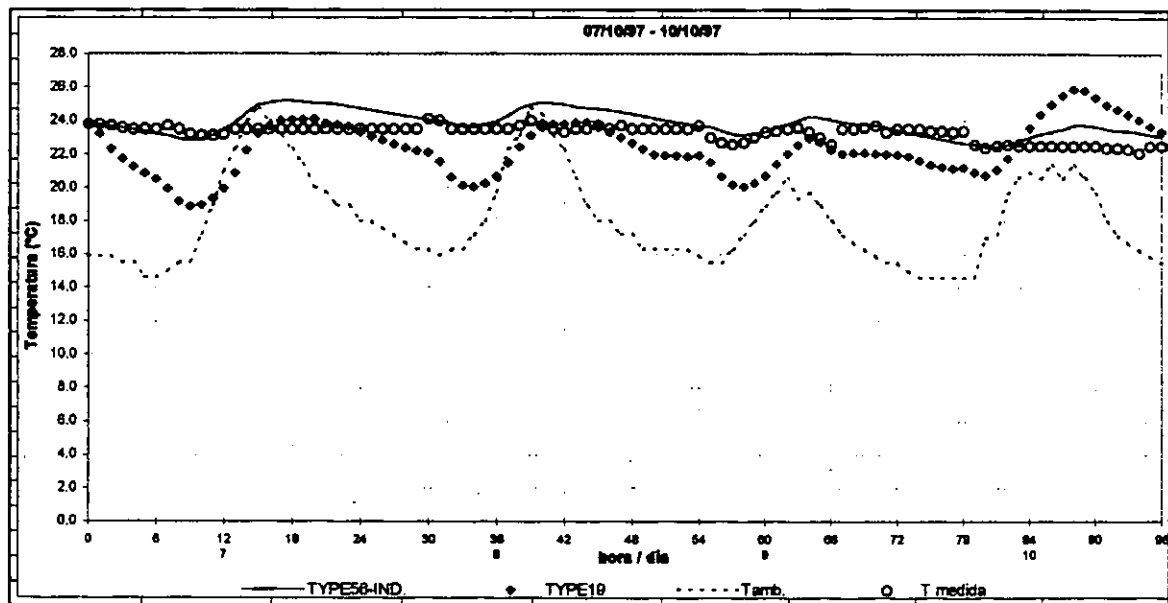
Al observar las salidas del TYPE 56 en la gráfica 6.4.1, se puede notar que prácticamente no existe diferencia entre las estimaciones para el caso donde se simuló todo el departamento (TYPE56-DEP) y el caso donde se simuló solamente la habitación (TYPE56-IND), de tal manera que puede decirse que al simular de manera aislada un espacio dentro de una estructura mayor, se pueden obtener muy buenos resultados con este TYPE.

También es visible que ambas simulaciones se apegan en gran medida a las mediciones, mostrando ligeramente mayor calentamiento del espacio durante el día que lo que se presenta en la realidad.

En el caso donde el coeficiente de convección varía conforme a la velocidad del viento ($h_o = \text{var.}$), se observa que existe un sobrecalentamiento con respecto a las mediciones, es decir, que debido a que la velocidad del viento es baja durante el periodo de comparación, el valor de h_o es muy bajo y por consiguiente, no existe el enfriamiento adecuado.

A partir de los resultados mostrados en la gráfica 6.4.1, se puede decir que es más conveniente considerar un valor de constante $h_o = 20.8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (correspondiente a una velocidad de viento de 4m/s) para realizar las simulaciones en el TYPE 56, y no variarlo conforme la velocidad corriente del viento.

Como las salidas del caso en que se simuló todo el departamento no difieren del caso en que se simuló únicamente la habitación, se han escogido éstas últimas para la comparación con el TYPE 19. En la gráfica 6.4.2 se presentan las salidas del TYPE 19, el TYPE 56 y las mediciones.



Gráfica 6.4.2 Comparación de las salidas del TYPE19- TYPE56 y las mediciones en la habitación del departamento.

Al comparar las mediciones con las salidas del TYPE 56 y del TYPE 19, se observa que el TYPE 19 presenta marcadas diferencias con respecto al TYPE 56 así como con los datos monitoreados, reflejando más bien, las condiciones de temperatura exterior y mostrando apenas un pequeño

amortiguamiento térmico en el interior. Esto puede deberse principalmente a las diferencias en los modelos matemáticos de ambos types.

El TYPE 56, como ya se mencionó, muestra una gran cercanía con los datos medidos, aunque es visible que estos últimos no presentan un comportamiento repetitivo como sucede con el TYPE56 cada 24 horas. Esto se puede deber a algunas actividades que no se han considerado dentro de las entradas del simulador por no ser rutinarias, sino más bien esporádicas, sin embargo, las diferencias que se presentan siempre son menores a 2°C.

Por otra parte, al analizar los datos monitoreados, es muy clara una estabilidad térmica muy importante dentro la habitación, que no muestra grandes diferencias de temperatura por la tarde a pesar de estar orientada al poniente. Esto puede deberse a que el área de la ventana es muy pequeña (aproximadamente el 15% de la superficie del muro), y que tanto los muros como el techo (que recibe la radiación solar prácticamente todo el día), están contruidos con materiales huecos, funcionando como elementos relativamente aislantes debido al aire contenido en su interior. Además, es muy posible que la ventana haya permanecido con la cortina cerrada durante la tarde, impidiendo de ésta manera, que la radiación fuera absorbida por el mobiliario o los elementos constructivos interiores. No obstante, y a pesar de que el TYPE 56 muestra también pocas variaciones en la temperatura, existia la incertidumbre si el termohigrógrafo no había sido calibrado adecuadamente o si se hubiera presentado alguna falla durante el período del monitoreo, por lo cual se decidió no llevar a cabo la corrida correspondiente con DOE-2, sino realizar un nuevo análisis donde se tuvieran datos más controlados para poder corroborar los resultados y evitar esta

incertidumbre. Para tal efecto se contó con los datos de un monitoreo realizado en la ciudad de Hermosillo, Sonora, cuyos detalles se presentan en el siguiente capítulo.

No obstante, independientemente de que los datos monitoreados pudieran presentar ligeras fallas, es posible determinar algunas conclusiones con respecto al análisis realizado, las cuales se presentan a continuación.

6.5 Conclusiones

1. El TYPE 19 es muy sensible a las variaciones de la temperatura ambiental, pues sus salidas inmediatamente se alejan de la temperatura especificada como inicial, y se apegan mucho a la temperatura exterior, mostrando apenas un pequeño retardo térmico.
2. El TYPE 56 presenta una buena opción para la simulación térmica de edificios en condiciones de clima templado, como la Cd. de México.
3. El TYPE 19 es muy restringido para poder determinar adecuadamente las condiciones de un espacio, como la ventilación, itinerarios de uso, características constructivas, etc.
4. Es más conveniente determinar el valor constante de $h_o = 20.8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, que modificarlo de manera horaria de acuerdo a la velocidad del viento.

5. Aún cuando existen variables, como las ganancias internas, que no pueden ser determinadas con exactitud, y que sin duda influyen en los resultados finales, el TYPE 56 puede presentar resultados muy aceptables.

Capítulo 7

2º ANÁLISIS EXPERIMENTAL:

TRNSYS Y DOE-2

Como se mencionó en el capítulo anterior, debido a la incertidumbre de los datos monitoreados en la habitación del edificio multifamiliar, en la zona de Copilco, en el D.F., se decidió realizar un nuevo análisis con datos más controlados, para lo cual se contó con los datos de un monitoreo efectuado en un espacio destinado para un laboratorio de investigación en Hermosillo, Son., donde se tiene además, la información climatológica monitoreada en el mismo sitio, de tal modo que el margen de error en este rubro se disminuye notablemente con respecto al análisis experimental previo.

Dadas las características para este caso, el espacio monitoreado se pudo analizar con los dos modelos estudiados en este trabajo: TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E.

7.1 Metodología

Al igual que en el caso anterior, en este análisis se utilizó la metodología de *Validez Empírica* propuesta por Judkoff y Neymark¹, contando con los datos meteorológicos monitoreados *in situ* y con las mediciones de la temperatura del aire del interior del espacio, para las comparaciones con las salidas de TRNSYS 13.1 y DOE-2.1 E.

7.2 Descripción del Proyecto.

A diferencia del caso anterior, el espacio monitoreado en este segundo análisis, consiste en un cubículo destinado como laboratorio de investigación, en el Laboratorio de Termodinámica del edificio de Ingeniería Química de la Universidad de Sonora, en Hermosillo, Sonora.

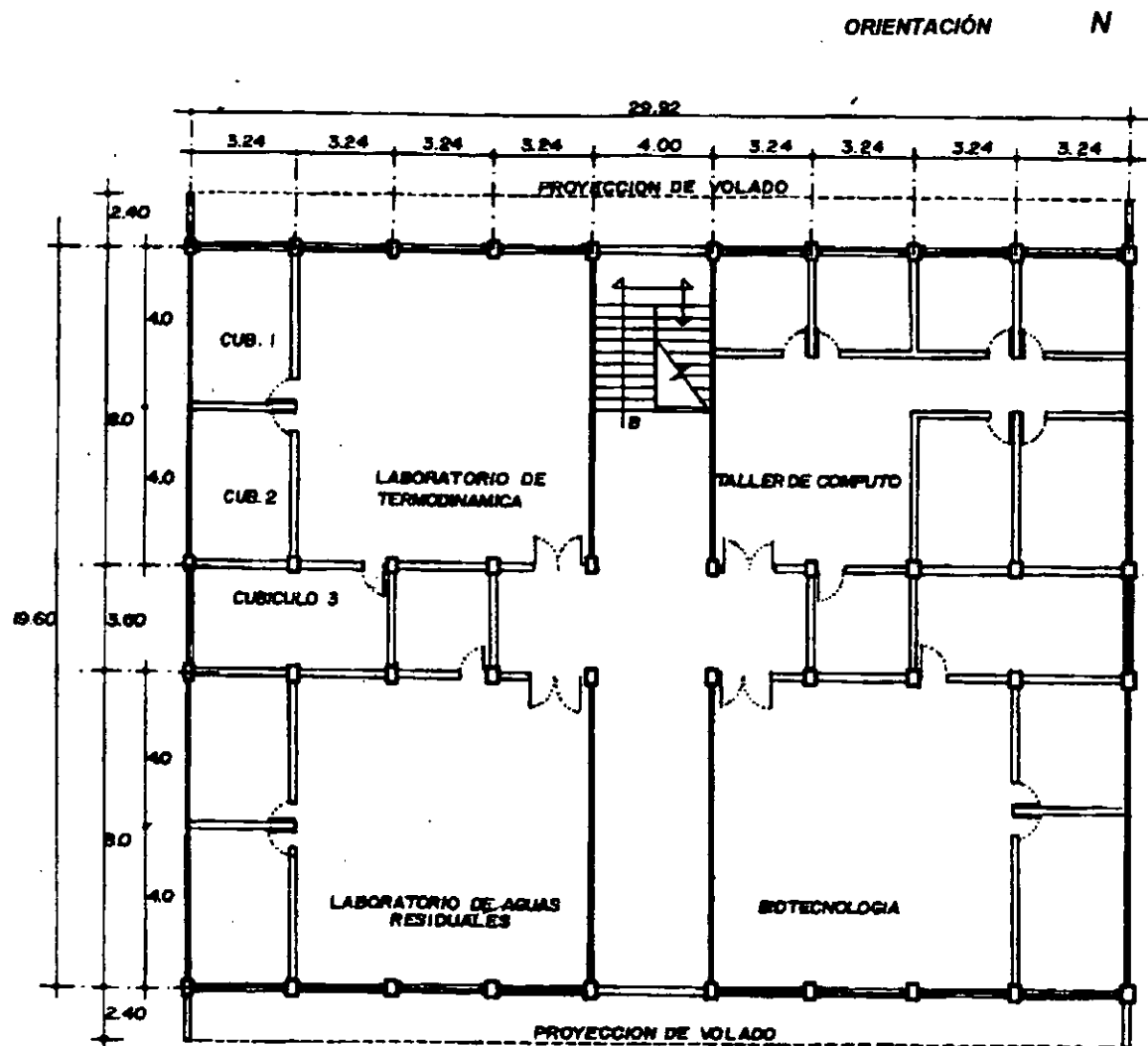


Fig. 7.2.1 Planta arquitectónica del Laboratorio de Termodinámica (2° nivel del laboratorio de Ingeniería Química, Universidad de Sonora).

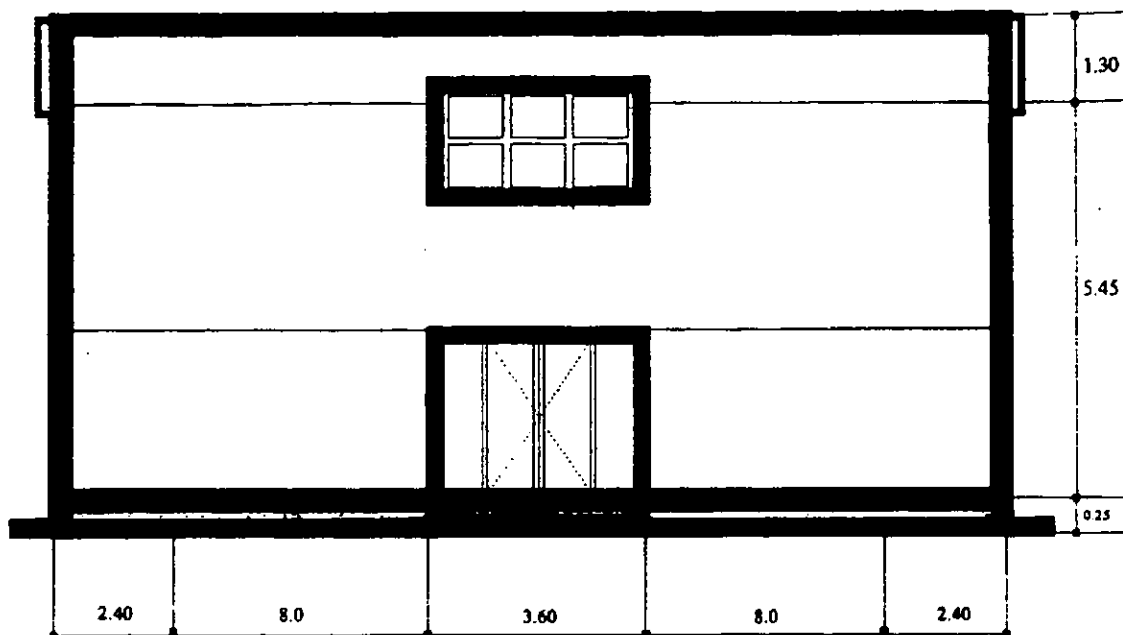


Fig. 7.2.2 Fachada Sur del Laboratorio de Ingeniería Química.

El edificio completo consta de dos plantas, ubicándose el espacio monitoreado en el segundo nivel, cuya planta se muestra en la figura 7.2.1. El espacio analizado es el cubículo 3, correspondiente al área sombreada de la figura 7.2.1 y como se puede ver, a pesar de que el edificio tiene una orientación principal Norte -Sur, el cubículo de interés cuenta únicamente con orientación hacia el sur, siendo el área de ventana aproximadamente el 30% de la fachada con esta orientación.

La cubierta del edificio es prácticamente horizontal, y por lo tanto, recibe la radiación solar durante todo el día. En la figura 7.2.2 se muestra la fachada sur del edificio, el área de ventana que se observa en la parte alta de dicha fachada, corresponde al cubículo analizado (cubículo 3). Las características térmicas de los materiales de construcción del edificio se muestran en la tabla 7.2.1.

MATERIAL	DENSIDAD Kg/m³	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m °C)	CALOR ESPECÍFICO (Kj/kg °C)
YESO	1280	0.46	0.9
MORTERO (cem-are)	2000	0.63	1.1
TABIQUE	1919	0.65	0.745
MOSAICO	480	0.49	0.85
CONCRETO	2300	1.8	1.25
POLIESTIRENO	440	0.26	1.21

Tabla 7.2.1 Propiedades térmicas de los materiales constructivos del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Sonora.

Para llevar a cabo las simulaciones, en los dos modelos se contempló el intercambio térmico que existe entre el cubículo analizado y los espacios contiguos a él, por lo que también se consideraron las características de estos últimos. En este sentido, las paredes con orientación este y oeste del edificio en cuestión contienen una capa de una pulgada de poliestireno extendido, que si bien no afecta directamente al cubículo monitoreado (orientación sur), si forma parte del laboratorio de termodinámica, adyacente al cubículo analizado. Las propiedades termofísicas de dicho aislante también se presentan en la tabla 7.2.1. También fue necesario tomar en cuenta el parasol que se desarrolla a lo largo de la fachada poniente del edificio, pues al menos durante el periodo del monitoreo, este elemento sombreaba adecuadamente el área acristalada del laboratorio de termodinámica, afectando indirectamente al cubículo de estudio.

7.2.1 Características del Espacio

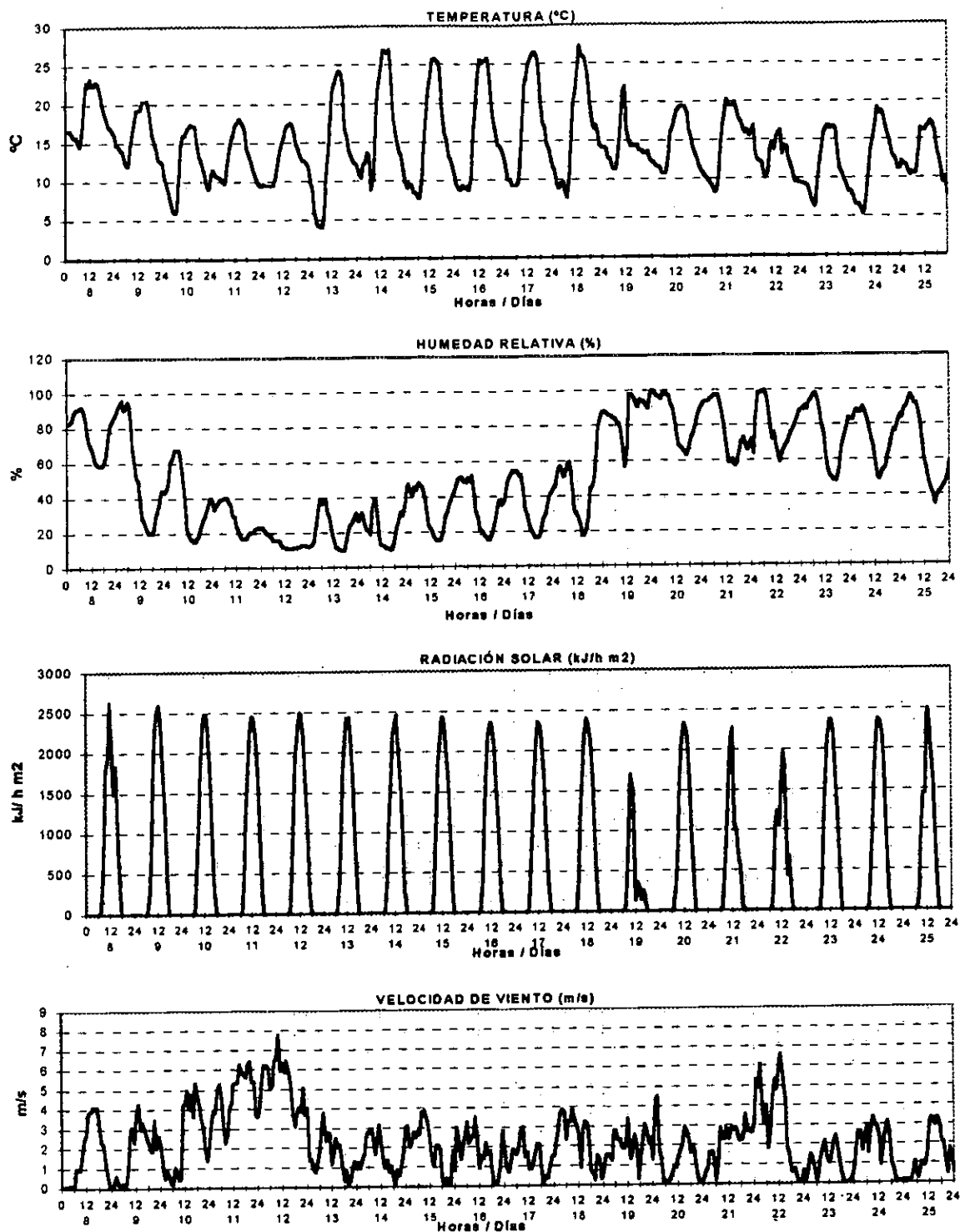
En la figura 7.2.1 se puede apreciar que el espacio analizado es bastante amplio, pues cuenta con una superficie de 23.3 m² y una altura de 3.15 m. Hay que mencionar que el cubículo se encontraba en

uso durante las mediciones, no obstante, la incertidumbre debida a esta situación es mínima, pues el uso que se hacía del espacio era solamente por una persona y un equipo de cómputo, ambos con itinerarios bien definidos. También se encontraba en uso la iluminación, únicamente a partir del momento que oscurecía hasta el final del itinerario de trabajo (aproximadamente de las 18 a las 21 hrs.), estimándose que tampoco se presenta un amplio margen de incertidumbre en este sentido.

7.3 Características del Monitoreo Ambiental

El monitoreo de los datos ambientales se llevó a cabo en el sitio con un adquisidor de datos marca Campbell modelo CR10, registrando la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y la radiación solar, así como la dirección y velocidad de viento. Los datos fueron registrados cada 10 minutos, del 7 al 25 de diciembre de 1997, pero para usos prácticos se ha utilizado el valor medio de una hora.

En la gráfica 7.3.1 se pueden ver las características ambientales presentadas durante el período antes mencionado. Es notable que del día 13 al 18, se presentan las temperaturas más altas, con una fuerte oscilación diaria, mientras que a partir del día 19, la radiación solar presenta fuertes altibajos y la temperatura es menor que los días previos, al igual que su oscilación diaria. Esta circunstancia permitirá obtener conclusiones de la operación de los programas bajo dos situaciones diferentes, por un lado, con una oscilación fuerte de la temperatura, y por el otro, con unas condiciones más estables.



Gráfica 7.3.1 Datos meteorológicos monitoreados en el edificio del Laboratorio de Ingeniería Química, en Hermosillo, Son., del 18 al 25 de Diciembre de 1997.

7.3.1 Características del Monitoreo Interior

En el interior del espacio las mediciones se realizaron con un termopar tipo K. Dado que los dos modelos de simulación consideran que el aire dentro de un espacio está totalmente mezclado, el termopar se colocó prácticamente en el centro del cubículo, a dos metros de altura. El punto “T” que se observa en la figura 7.2.3, indica la ubicación en planta donde se colocó el sensor, con el cual se registró solamente la temperatura de bulbo seco, siendo éste el único parámetro de comparación con los modelos de simulación.

Cabe mencionar que en la realidad, el aire contenido dentro de un espacio no se encuentra todo a la misma temperatura, sino que el aire más caliente tiende a estratificarse, además, las superficies que reciben la radiación solar durante el día, posteriormente re-radían el calor absorbido hacia el interior, de tal manera que conforme se disminuye la distancia hacia dichas superficies en el interior del espacio, el calor radiado por éstas se suma a la temperatura del aire. Se espera que estas circunstancias no afecten sensiblemente las mediciones, ya que el termopar se encontraba suficientemente alejado de dicho tipo de superficies.

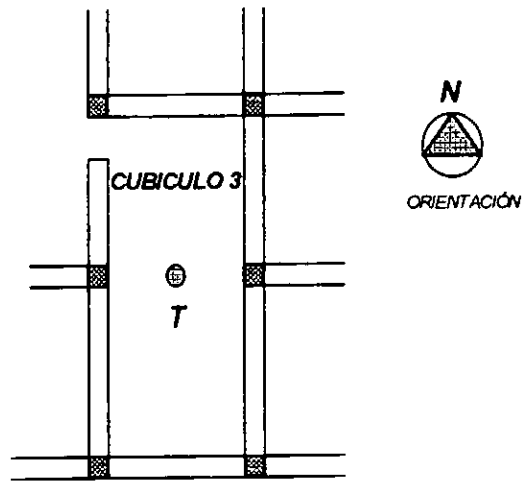


Fig. 7.2.3 Ubicación del termopar, en planta, dentro del espacio monitoreado en Hermosillo, Son. (cubículo 3).

7.4 Descripción del Espacio en los Modelos de Simulación

Como se ha mencionado anteriormente, para efecto de las simulaciones, se consideró el efecto que tendrían los espacios contiguos al cubículo analizado en la temperatura de éste último. Al respecto, se simuló la temperatura de los cubículo 1 y 2 así como del laboratorio de termodinámica, además del cubículo tres. A pesar de que en los dos modelos utilizados, la descripción de las condiciones de los espacios se puede hacer de manera detallada, existen algunas diferencias entre ellos que implican ciertas suposiciones para poder describirlos, mismas que pueden o no, ser diferentes en ambos programas.

Entre las principales características que requieren ser “adaptadas” a la descripción de los programas, se encuentra el intercambio de aire entre los espacios, las ganancias de calor internas, las ganancias o pérdidas de calor por infiltración o ventilación, el desarrollo de sombras y los datos climáticos disponibles, entre otras.

Intercambio de Aire entre los Espacios

En ambos programas se consideraron adiabáticos tanto el piso, como los muros que dividen a los espacios simulados del resto del edificio, sin embargo, al tomar en cuenta la interacción del cubículo de estudio con los otros espacios simulados, es necesario considerar el intercambio de aire entre ellos, ya que las puertas que los comunican se encontraban abiertas durante el periodo de mediciones.

En TRNSYS 13.1 el intercambio de aire entre los espacios se determina indicando el número de cambios de aire por hora que existe entre ellos, el cual queda prácticamente a criterio del usuario y cumple un papel importante de acuerdo a lo observado en el análisis de sensibilidad visto anteriormente (capítulo 5). Para la simulación de este caso de estudio, se determinaron 5 cambios de aire por hora entre los cubículos 1, 2 y 3 con el laboratorio de termodinámica, pero hay que observar que el laboratorio de termodinámica también presenta intercambio de aire con el vestíbulo de la planta alta del edificio. Para efecto de las simulaciones, en ambos modelos se consideró que la temperatura del vestíbulo mencionado se encontraba a la misma temperatura que el laboratorio, por lo cual, el flujo de aire y/o calor entre dichos espacios era prácticamente despreciable.

En DOE-2.1E no es posible indicar el intercambio de aire entre los espacios como tal, por lo tanto, en DOE-2.1E se describieron las superficies ocupadas por las puertas como “muros de aire”, de tal modo que existe una supuesta conducción de calor a través de tales elementos, aproximándose a lo que sería el intercambio de aire por diferencia de temperatura.

Ganancias Internas.

Como se mencionó al principio de este capítulo, el cubículo simulado se encontraba en uso durante las mediciones, no obstante, se estima que el efecto por esta situación es mínimo, ya que el espacio es bastante amplio y era usado solamente por una persona, con un itinerario bien definido, al igual que el equipo de cómputo y la iluminación requerida.

En la tabla 7.3.1 se presentan las cargas térmicas de dichos elementos así como los itinerarios indicados. Los fines de semana se anularon todas las ganancias internas debido a la ausencia de usuarios.

ESPACIO	PERSONAS	EQUIPO	ILUMINACIÓN
LABORATORIO -ITINERARIO-	0	0	560 W 18-21 hrs
CUBICULO 1 -ITINERARIO-	150 W 9-14hrs / 18-21 hrs	500 W 9-14hrs / 18-21 hrs	140 W 18-21 hrs
CUBICULO 2 -ITINERARIO-	150 W 9-14hrs / 18-21 hrs	500 W 10-15hrs / 17-20hrs	140 W 9-14hrs / 18-21 hrs
CUBICULO 3 -ITINERARIO-	150 W 10-15hrs / 18-21 hrs	500 W 9-14hrs / 18-21 hrs	280 W 18-21 hrs

Tabla 7.4.1 Cargas térmicas e itinerarios correspondientes a cada espacio simulado.

Ventilación e Infiltración

Las ventanas de los cubículos permanecieron cerradas durante las mediciones, de tal manera que el edificio se contempló sellado en ambos programas para efecto de las simulaciones y por consiguiente, tanto la ventilación como la infiltración se consideraron inexistentes.

Desarrollo de Sombras

A lo largo de las fachadas oriente y poniente del edificio, en la parte superior, se desarrollan unos parasoles que generan una sombra sobre las superficies acristaladas del segundo nivel. En el laboratorio de termodinámica, esta sombra produce una disminución de las cargas térmicas y por lo tanto, es necesario considerarla para las simulaciones. Tanto en TRNSYS 13.1 como en DOE-2.1E se puede describir esta situación adecuadamente, pero la manera en que se hace varía significativamente entre los dos modelos. DOE-2.1E simula automáticamente el desarrollo de sombras indicando únicamente que el elemento descrito produce sombras en el edificio. En el caso de TRNSYS 13.1 esta característica es un poco más laboriosa, pues se debe incluir un nuevo *type* (el TYPE 34) en la elaboración del archivo de simulación, para describir dicho elemento. Aunque en este trabajo no se describirá detalladamente este *type*, sí fue incluido en la simulación de TRNSYS, pudiéndose ver su descripción en el Apéndice C, en el *deck* de simulación de TRNSYS.

Datos Climáticos

Para realizar una simulación, TRNSYS 13.1 requiere los datos horarios de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y radiación solar global sobre una superficie horizontal, por lo cual, con los datos monitoreados fue más que suficiente, no así para el caso de DOE-2, el cual requiere además,

las componentes difusa y directa de la radiación solar, o en su defecto, la cobertura de nubes a partir de la cual es posible obtener las componentes mencionadas de la radiación. Como estos datos no fueron registrados en el monitoreo, se estimaron con el procesador de radiación solar de TRNSYS 13.1 (TYPE 16), utilizando el modelo de Reindl²⁷.

7.5. Otras Consideraciones en TRNSYS 13.1

Como se observó en el capítulo de sensibilidad de TRNSYS 13.1 (cap. 5), una variable de suma importancia para obtener buenos resultados es el valor del coeficiente de convección exterior (h_o). Para analizar cómo afecta esta variable, se han realizado dos simulaciones con TRNSYS 13.1 para comparar sus resultados con las mediciones. En primer lugar, se realizó una simulación indicando el valor de h_o dependiente de la velocidad de viento, de acuerdo con la ecuación 3.4.2.3, utilizada por TRNSYS 13.1 en el TYPE 19, misma que se expresa como sigue:

$$h_{e,o} = 5.7 + 3.8 W \quad (W/m^2C) \quad (3.4.2.3)$$

donde W = velocidad de viento (m/s)

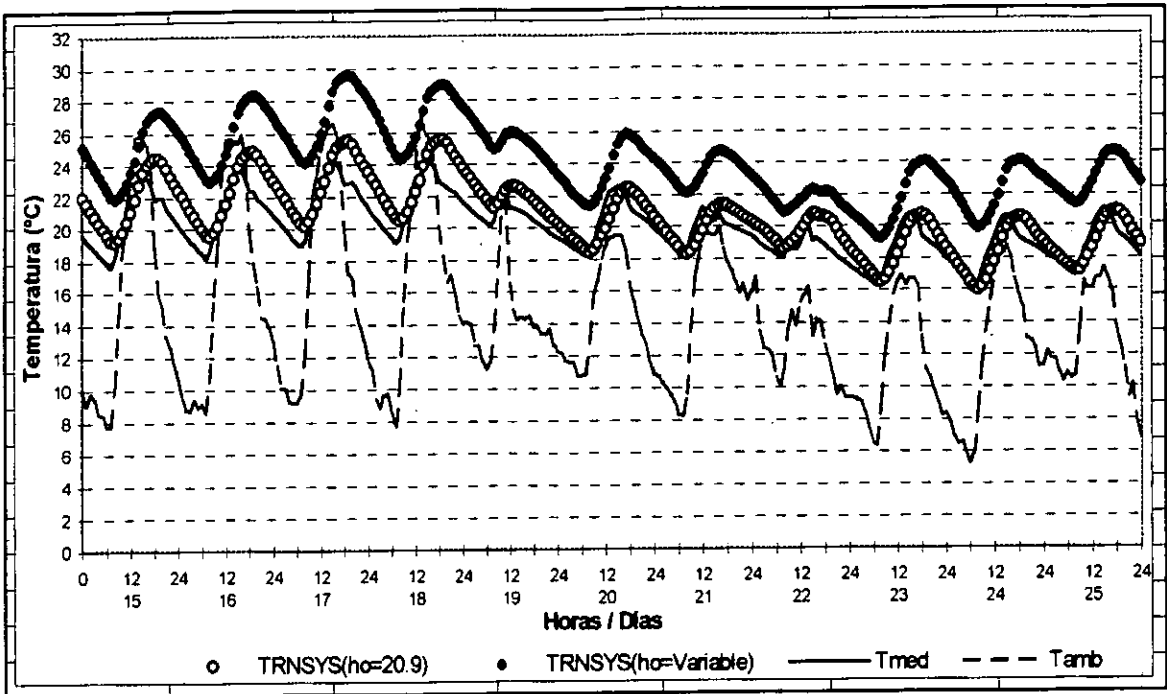
Al asignar dicha ecuación en el archivo de simulación de TRNSYS 13.1, el valor de h_o se estimó cada hora de acuerdo a la velocidad de viento estimada en el sitio, siendo variable durante todo el período de simulación.

En segundo lugar, se determinó el valor de h_o constante. Como se observó que el generador de datos (TYPE54), cuando no se introduce la velocidad de viento, considera por default un valor de 4m/s, es posible que las correlaciones utilizadas para generar las funciones de transferencias o que algunas correlaciones internas del programa también utilicen el mismo valor. Debido a esto, h_o se estimó utilizando la ecuación mencionada arriba para una velocidad de viento de 4m/s, dando como resultado el valor constante de $h_o = 20.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ con el que se llevó a cabo la simulación.

7.5.1 Resultados de TRNSYS 13.1

En la gráfica 7.5.1 se muestran las salidas de TRNSYS 13.1 con las dos condiciones mencionadas anteriormente. Se puede ver claramente que las salidas, cuando h_o depende de la velocidad de viento, muestran temperaturas muy altas con respecto a las mediciones, las cuales disminuyen notablemente el día 22. Esta disminución es obvia si se observa la gráfica 7.3.1, ya que la velocidad de viento el día mencionado oscila entre 3 y 6 m/s, generando valores de h_o muy altos, es decir, que existe mayor enfriamiento del edificio que en el resto del período analizado.

También se puede observar, en el mismo caso, que la diferencia en temperatura oscila constantemente (excepto el día 22) alrededor de 4°C arriba de las mediciones durante todo el período de simulación, es decir, que no hay mucha diferencia entre los días extremos y los días templados.



Gráfica 7.5.1 Comparación de las salidas de TRNSYS 13.1 usando h_0 variable conforme a la velocidad de viento y h_0 constante = $20.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

En el caso donde h_0 se determinó con el valor constante, las temperaturas estimadas concuerdan excelentemente con las mediciones, observándose apenas mayor retardo térmico en TRNSYS 13.1 que en las mediciones. Por esta razón, estas serán las salidas que se tomarán como base de comparación entre TRNSYS 13.1, DOE-2.1E y los datos del monitoreo.

7.6 Resultados de las Simulaciones

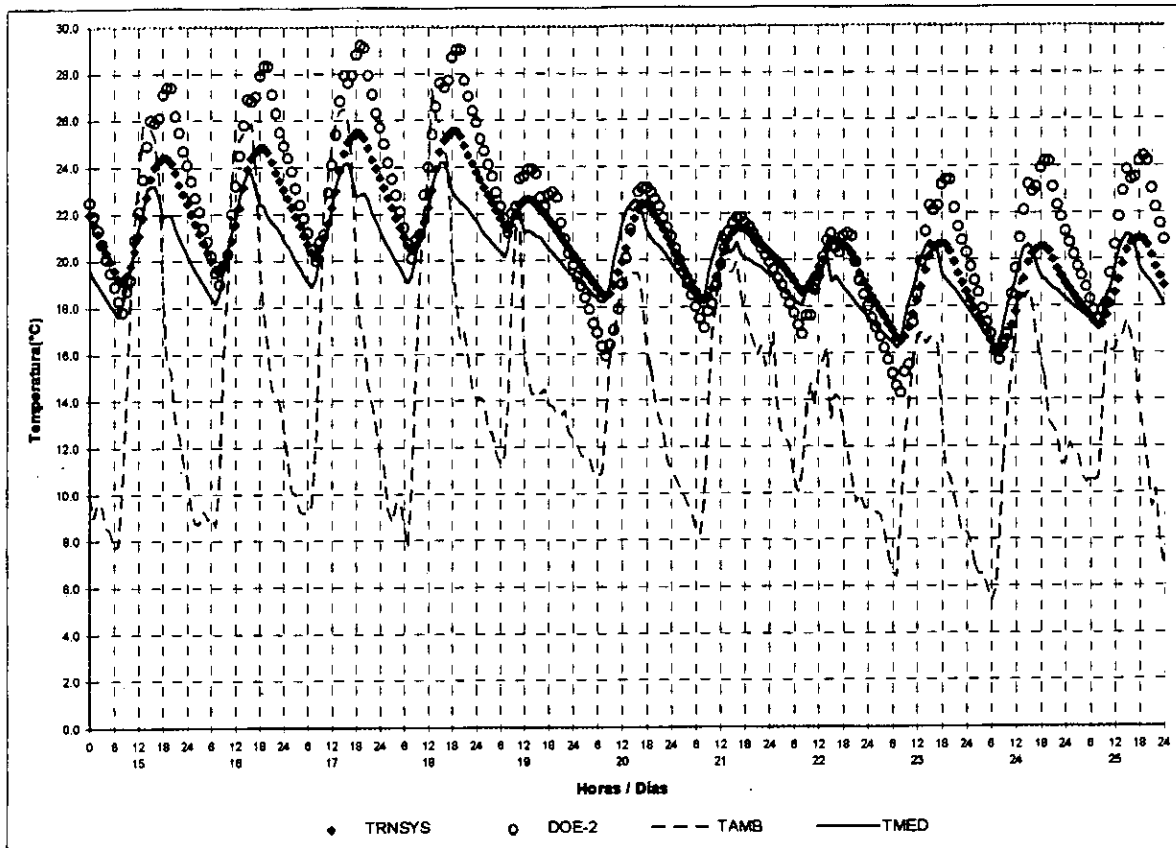
Al observar simultáneamente las salidas de los dos modelos y los datos medidos que se presentan en la gráfica 7.6.1, es posible determinar algunas características propias de cada programa. En las observaciones que se mencionan a continuación, al igual que en el análisis presentado más adelante, no se ha tomado en cuenta el día 19, por ser un día de transición entre los días extremosos y los días templados, donde el comportamiento tanto de las mediciones como de las salidas de los programas presentan muchas diferencias que producen confusiones para poder obtener conclusiones adecuadas.

La gráfica 7.6.1 muestra simultáneamente las temperaturas estimadas por TRNSYS 13.1 y DOE-2.1E, así como la temperatura medida, tanto en el interior del espacio como en el exterior. En dicha gráfica se puede observar lo siguiente:

Durante los días más extremosos, en ambos programas se observa mayor retardo térmico y calentamiento que en las mediciones, pero ésta característica se presenta diferente entre los dos modelos, ya que DOE-2 sobreestima tanto el calentamiento como el enfriamiento del espacio, comparados éstos con las mediciones, mientras que TRNSYS 13.1 parece mantenerse constante en sus estimaciones ligeramente por arriba de las mediciones en los dos casos.

Es visible también, que la temperatura medida presenta una discontinuidad al decrecer a partir de su punto más alto durante los mismos días. En este sentido, DOE-2.1E también muestra una

discontinuidad, pero en su caso se presenta poco antes de llegar a la temperatura máxima. TRNSYS 13.1, por su parte, presenta una curva muy uniforme en todo su desarrollo.



Gráfica 7.6.1 Comparación de las temperaturas estimadas por TRNSYS 13.1, DOE-2.1E y las temperaturas medidas (período de comparación: 15/Dic/97 - 25/Dic/97).

A partir del día 20 de diciembre, cuando los días se presentan con una temperatura más estable, las predicciones de TRNSYS 13.1 se acercan mucho más a las mediciones, pero se sigue observando el mismo retardo térmico que en los días extremos con respecto a las mediciones. Las estimaciones de DOE-2.1E, en este caso, son un poco inconsistentes, pues entre el día 20 y el 23, las salidas del programa sobreestiman el enfriamiento del espacio, mientras que al predecir el calentamiento, se aproximan mucho a las mediciones. A partir del día 23, DOE-2.1E vuelve a presentar el

comportamiento mostrado en los días extremos, donde las temperaturas mínimas concuerdan en gran medida con las mediciones y las máximas sobreestiman el calentamiento al compararse con el monitoreo.

Es notable que los días 21 y 22 de diciembre, las predicciones de DOE-2.1E se aproximan más a las mediciones. Al revisar los datos climatológicos, el único parámetro que muestra diferencias en los mismos días con respecto al resto del período monitoreado, es el viento. Se puede notar que los días 21 y 22 presentan velocidades de viento entre 3 y 6 m/s, lo cual hace suponer que posiblemente en DOE-2.1E también pueda ser éste un factor que impere para la obtención de resultados adecuados, pero tal análisis no ha sido posible incluirlo en el presente estudio.

Para poder determinar con mayor precisión las características de los dos programas, a continuación se presenta un análisis más detallado.

7.7 Análisis de los Resultados de la Simulaciones

En el análisis presentado aquí, se han realizado varias comparaciones entre las salidas de los modelos y los datos monitoreados, con el propósito de determinar lo más ampliamente posible las características de cada programa. Los datos que se han comparado en este caso son: Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Oscilación Diaria de la Temperatura y Retardo Térmico.

Así mismo, se han utilizado dos metodologías para evaluar la precisión de los programas bajo una escala cuantitativa, aplicando en primer término la metodología propuesta por Lomas¹³ en un Estudio de Aplicabilidad, y en segundo lugar, obteniendo el error porcentual de cada programa. Estas metodologías se explican más adelante.

7.7.1 Análisis Comparativo.

Para determinar con mayor detalle las observaciones realizadas en la gráfica 7.6.1, se ha recurrido a los valores numéricos de las salidas de los programas y de las mediciones, a fin de comparar con datos exactos las características de los mismos. En la tabla 7.7.1, se presentan los valores mencionados organizados de acuerdo a las comparaciones realizadas, de los cuales se obtuvo lo siguiente:

Durante los días más extremos (entre el 15 y el 18 de Diciembre), la temperatura de TRNSYS 13.1 se encuentra entre 1.02 y 1.51°C más alta que en las mediciones, tanto para las temperaturas máximas como para las mínimas, mostrando un comportamiento térmico del espacio muy semejante al que se observa en la realidad. DOE-2.1E, por su parte, también presenta temperaturas más altas que las mediciones, excediendo a estas entre 4.19 y 5.02 °C en las temperaturas máximas y entre 0.19 y 1.13 °C en las mínimas, concordando en mayor grado que TRNSYS 13.1 en estas últimas (ver tabla 7.7.1).

Día	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
TEMPERATURA MÁXIMA (°C)											
TRNSYS	24.4	24.84	25.48	25.54	22.62	22.42	21.37	20.79	20.69	20.53	20.89
DOE-2	27.4	28.3	29.2	29	23.9	23.1	21.8	21.1	23.4	24.2	24.4
MEDICIONES	23.21	23.82	24.18	24.2	22.18	22.58	20.75	20.25	20.78	20.63	20.96
TEMPERATURA MÍNIMA (°C)											
TRNSYS	19.12	19.54	20.22	20.46	20.27	18.45	18.29	18.6	16.51	16	17.14
DOE-2	17.8	19	20	20.1	19.8	15.9	17.1	16.8	14.3	15.7	17.4
MEDICIONES	17.61	18.16	18.87	19.06	19.36	18.19	18.14	18.07	16.21	16.13	17.8
OSCILACION DE LA TEMPERATURA (°C)											
TRNSYS	5.28	5.3	5.26	5.08	2.35	3.97	3.08	2.19	4.18	4.53	3.75
DOE-2	9.6	9.3	9.2	8.9	4.1	7.2	4.7	4.3	9.1	8.5	7
MEDICIONES	5.6	5.66	5.31	5.14	2.82	4.39	2.61	2.18	4.57	4.5	3.16
RETARDO TÉRMICO (Temperatura Máxima hrs.)											
TRNSYS	2	4	2	2	3	2	1	2	3	3	2
DOE-2	3	4	3	3	2	2	0	0	3	4	3
RETARDO TÉRMICO (Temperatura Mínima hrs.)											
TRNSYS	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
DOE-2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0

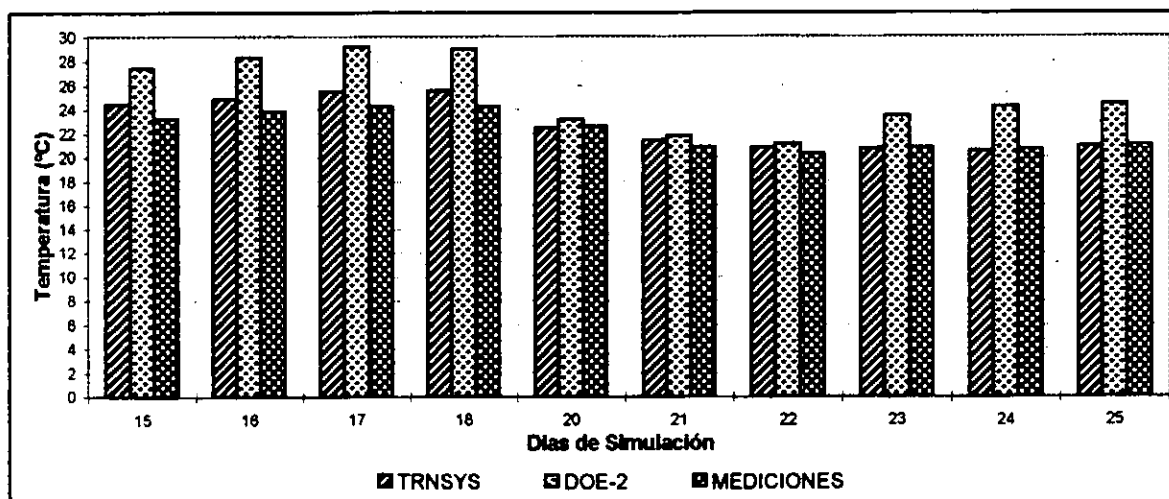
Tabla 7.7.1 Comparación entre las salidas de los modelos de simulación y las mediciones.

* El retardo térmico es con respecto a la temperatura medida.

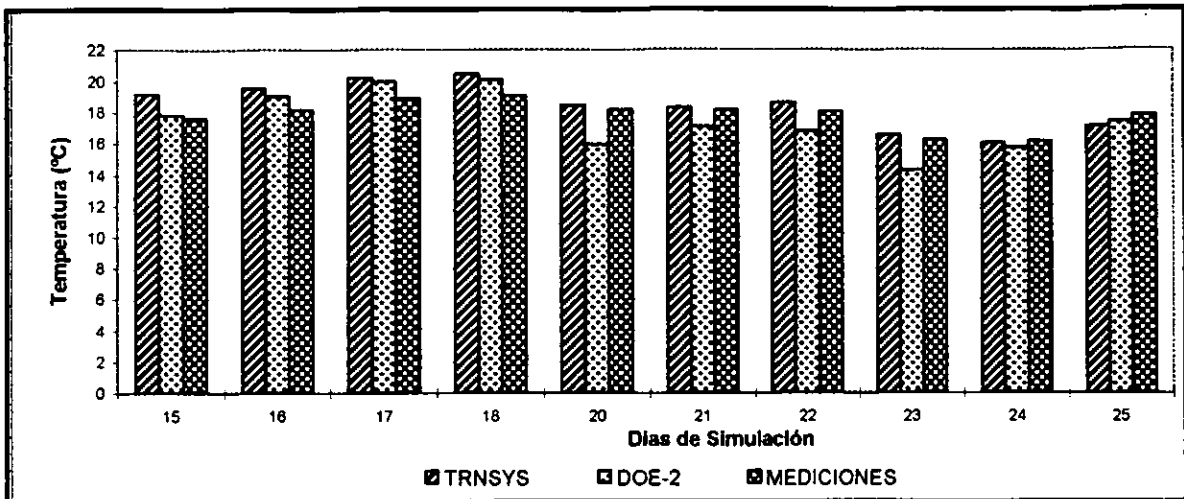
Al analizar en la tabla 7.7.1 las diferencias en las temperaturas estimadas y medidas en los días más estables, las predicciones de TRNSYS 13.1 se aproximan todavía más a las mediciones, observándose apenas una diferencia máxima de 0.62°C para las temperaturas más altas y de 0.66 °C para las más bajas. En este periodo no es posible determinar el comportamiento de DOE-2.1E debido a las inconsistencias mencionadas anteriormente, ya que en las temperaturas máximas estimadas del día 20 al 22, DOE-2.1E se aproxima entre 0.35 y 1.05 °C a las mediciones, pero del día 23 al 25 se vuelve a alejar, mostrando diferencias de entre 2.62 y 3.57 °C. En las temperaturas mínimas, por otro lado, del día 20 al 23, DOE-2.1E presenta estimaciones entre 1.04 y 2.29 °C por debajo de las mediciones, aproximándose más los días 24 y 25, cuando estas diferencias se reducen a 0.43 y 0.4 °C respectivamente.

En la gráfica 7.7.1 se puede ver más fácilmente que las temperaturas máximas estimadas por TRNSYS 13.1 son más cercanas a las mediciones que las estimadas por DOE-2.1E, las cuales se ven aún más alejadas durante los días más extremosos. Durante el período más templado, las predicciones de TRNSYS 13.1 se aproximan en mayor grado a las mediciones y DOE-2.1E no muestra un comportamiento uniforme, sin embargo, al comparar las temperaturas mínimas en la gráfica 7.7.2, si es visible que DOE-2.1E siempre mantuvo sus estimaciones por debajo de las mediciones durante los días templados y muy cercanas, aunque superiores, durante los días extremosos. TRNSYS 13.1, en este sentido, se mantuvo con estimaciones apenas superiores a las temperaturas medidas en los días extremosos y concuerda excelentemente en los días templados.

De esta comparación, se puede decir que TRNSYS 13.1 presenta un comportamiento térmico muy cercano al que sucede en la realidad, tanto en climas extremosos como en climas templados, mostrando temperaturas que concuerdan en gran medida con la realidad, no así DOE-2.1E, que presenta ciertas inconsistencias en los días templados y fuertes diferencias en los extremosos.

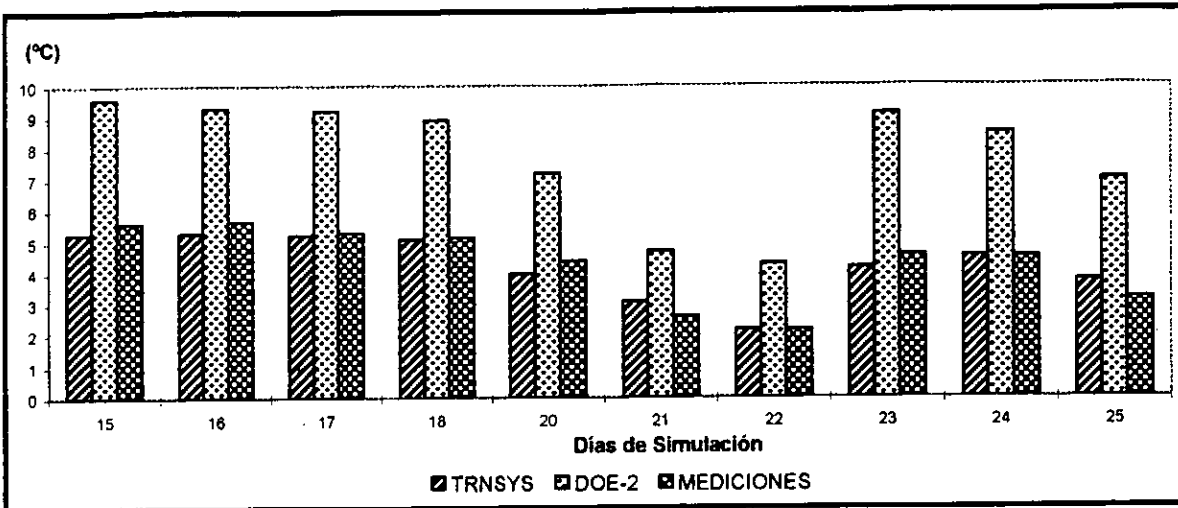


Gráfica 7.7.1 Temperatura Máxima medida y estimada por los modelos de simulación.



Gráfica 7.7.2 Temperatura Mínima medida y estimada por los modelos de simulación.

Si se compara las oscilación térmica diaria, en la tabla 7.7.1 se observa que las oscilaciones estimadas por TRNSYS 13.1 se acercan mucho a las oscilaciones que se observan en las temperaturas medidas, sólo con diferencias entre 0.01 y 0.59 °C, lo cual es prácticamente despreciable. DOE-2.1E, por otra parte, se aleja mucho en este caso con respecto a los datos medidos, pues presenta oscilaciones mayores a las mediciones por lo menos en 3.76 °C. En la gráfica 7.7.3 se puede ver a simple vista esta característica. En la misma gráfica, se puede observar también que para los días templados, la diferencia entre la oscilación térmica calculada por TRNSYS 13.1 y la medida se mantiene estable, mientras que DOE-2.1E aún es marcadamente diferente, siendo mayor su oscilación térmica diaria que la medida entre 2.09 y 4.64 °C.



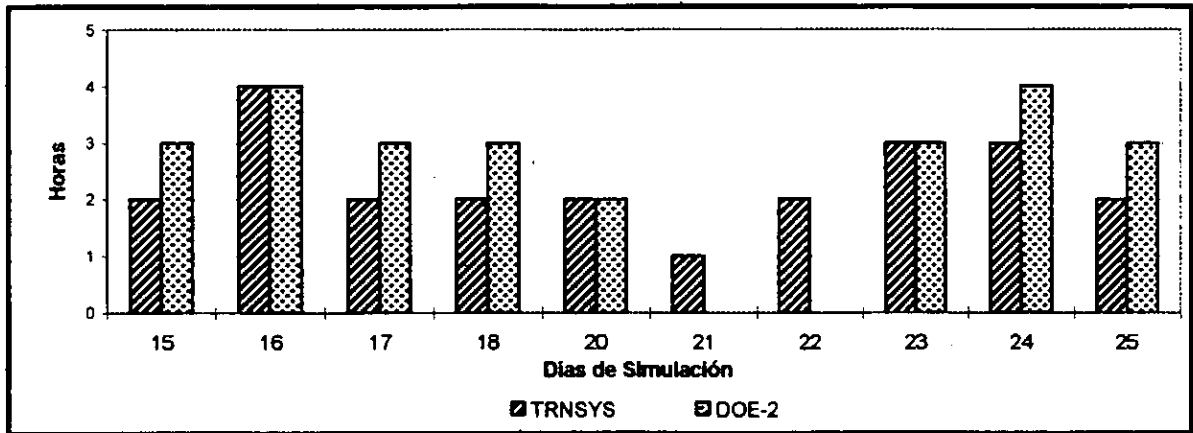
Gráfica 7.7.3 Comparación entre la Oscilación Térmica diaria de las mediciones y las salidas de los modelos de simulación.

Otro aspecto comparable es el retardo térmico estimado por los modelos de simulación, el cual ya se había hecho notar a partir de la gráfica 7.6.1.

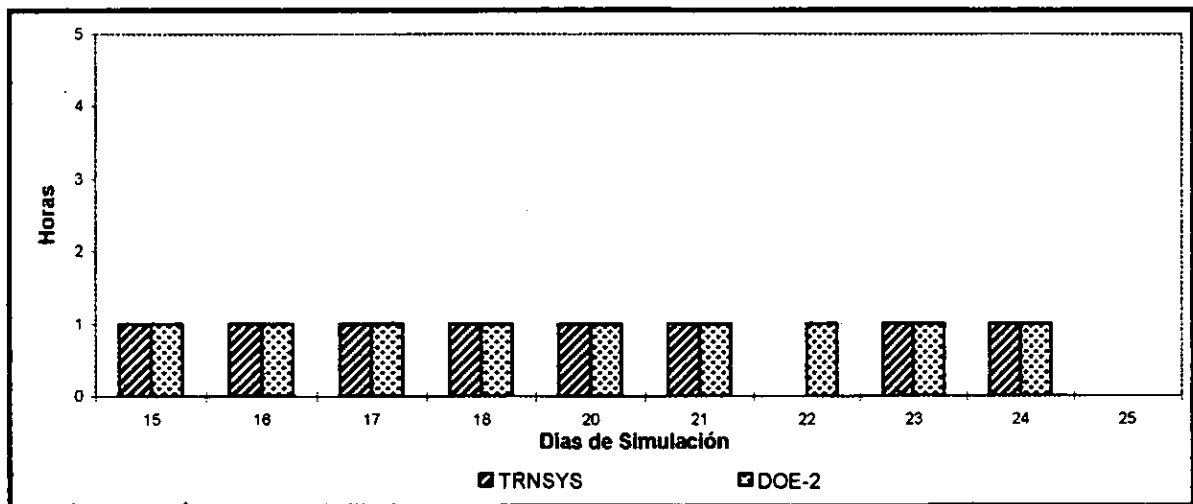
La comparación hecha en este rubro, se ha realizado a partir del retardo térmico medido, es decir, se ha comparado el desfaseamiento que existe en el tiempo, entre la temperatura máxima medida y la temperatura máxima estimada por cada programa, no a partir de la temperatura máxima exterior. Así mismo, se comparó el desfaseamiento en el tiempo entre la temperatura mínima medida y la temperatura mínima estimada por ambos modelos.

Como puede verse en la tabla 7.7.1, existen mayores diferencias entre la hora en que se presentan las temperaturas máximas que entre las mínimas, siendo DOE-2.1E el que presenta mayor retardo térmico de los dos programas.

En la gráfica 7.7.4 se ve claramente que TRNSYS 13.1 presenta en promedio, entre 2 y 3 horas más de retardo térmico que el que sucede en la realidad, mientras que DOE-2.1E estima las temperaturas más altas de 3 a 4 horas más tarde que las mediciones.



Gráfica 7.7.4 Retardo térmico de las salidas de los modelos con respecto a las mediciones en la temperatura máxima diaria.



Gráfica 7.7.5 Retardo térmico de las salidas de los modelos con respecto a las mediciones en la temperatura mínima diaria.

Estas diferencias se ven notablemente disminuidas al calcular el momento en que se presentan las temperaturas mínimas. Como se puede apreciar en la gráfica 7.7.5, en este sentido los dos programas son muy consistentes al mostrar un retardo térmico de apenas 1 hora más que lo que sucede en la realidad.

7.7.2 Evaluación de los programas.

Para evaluar la precisión de los programas, se ha adoptado en primer lugar la clasificación establecida por Lomas¹³ en un Estudio de Aplicabilidad, misma que se muestra en la siguiente tabla:

CLASIFICACIÓN	DEFINICIÓN
EXCELENTE	Las predicciones de la temperatura absoluta difieren en menos de 1.5°C
BUENO	Las predicciones de la temperatura absoluta difieren entre 1.5°C y 3.0°C
POBRE	Las predicciones de la temperatura absoluta difieren entre 3°C y 4.5°C
MALO	Las predicciones de la temperatura absoluta difieren por más de 4.5°C

Tabla 7.7.2 Criterios para la Evaluación de las predicciones de los modelos (Lomas, 1992)¹³.

Para clasificar los resultados de los modelos de acuerdo a la propuesta de Lomas¹³, se consideraron los 11 días de comparación, es decir, en este caso no se hizo ninguna separación entre los días extremos y los templados, sino que, como se observa en la tabla se han tomado las temperaturas máxima absoluta y mínima absoluta de todo el período de simulación. En la tabla 7.7.3 se pueden ver las temperaturas mencionadas y la diferencia entre las mediciones y las salidas de los modelos.

	MEDICIONES	TRNSYS 13.1		DOE-2.1E	
		Predicción	Diferencia	Predicción	Diferencia
TEMPERATURA MÁXIMA	24.2 °C Día 18 , Hora 16.	25.4 °C Día 18 , Hora 18	+1.2 °C	29.2 °C Día 17 , Hora 19	+2.54 °C
TEMPERATURA MÍNIMA	16.13 °C Día 24 , Hora 7.	16.0 °C Día 24 , Hora 8	-0.13 °C	14.3 °C Día 23 , Hora 8	-1.83 °C

Tabla 7.8.3 Temperaturas Máximas y Mínimas Absolutas y Diferencia entre las mediciones y las predicciones de los Modelos de Simulación.

La temperatura máxima absoluta estimada por TRNSYS 13.1 difiere en 1.2°C de las mediciones, considerándose como una **EXCELENTE** concordancia de acuerdo a ellas, al igual que en la temperatura mínima, donde la diferencia es de apenas 0.72°C.

DOE-2.1E, por su parte, se puede clasificar como **BUENO** al predecir la temperatura máxima (Diferencia = 2.54°C) y como **EXCELENTE** al predecir la mínima (Diferencia = 1.83 °C).

A pesar de que de acuerdo a la clasificación de Lomas, los programas muestran una concordancia entre BUENA y EXCELENTE, se debe observar que el día en que presenta la temperatura máxima absoluta DOE-2.1E es diferente del día en que la presentan las mediciones. Si se tomara el mismo día dicha diferencia, en la tabla 7.6.1 se puede ver que el día en que DOE-2.1E marca su temperatura máxima absoluta, las mediciones registran el valor más alto de 24.18 °C, es decir, que la diferencia sería de 5.02°C pudiéndose clasificar como una MALA concordancia con las mediciones, por lo cual, se ha optado por estimar el error porcentual de las salidas de cada programa diariamente, como se muestra adelante.

La estimación del error porcentual se ha realizado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_p = \frac{T_{medida} - T_{estimada}}{T_{medida}} \times 100\% \quad (7.7.2.1)$$

donde:

E_p = el error porcentual.

Si se tomara únicamente el error porcentual máximo de todo el periodo de simulación, se llegaría a la misma conclusión que con la tabla de Lomas, por lo tanto, en este caso se ha considerado el error porcentual diario. Como resultaría difícil evaluar a los programas debido a las diferencias de clasificación en las que caerían diariamente, se ha obtenido el valor medio del error porcentual observado durante todo el periodo, a partir del cual se hizo la clasificación correspondiente.

En la tabla 7.7.4 se muestran los rangos que se han establecido para clasificar a los programas. Puede verse que el error porcentual considerado para calificar a un programa como excelente es un poco amplio (3.0%). Se ha considerado este rango debido al margen de error que puede existir en las entradas, cuyas causas se han venido describiendo a lo largo de este capítulo.

En la tabla 7.7.5 se muestran los valores obtenidos del valor porcentual diariamente así como el valor medio obtenido a partir de los mismos. También se presentan, en la misma tabla, el valor medio diario de la temperatura medida y la estimada por los modelos así como la desviación media de las de las mismas, a partir de las cuales se pueden obtener mejores conclusiones.

CLASIFICACIÓN	DEFINICIÓN
EXCELENTE	El Error Porcentual es menor de 3%
BUENO	El Error Porcentual se encuentra entre el 3.1 y el 7%
REGULAR	El Error Porcentual se encuentra entre el 7.1 y 10%
MALO	El Error Porcentual es mayor del 10%

Tabla 7.8.4 Criterios para la Evaluación de las predicciones de los modelos de acuerdo al Error Porcentual de sus salidas.

ERROR PORCENTUAL DIARIO (T Max)											
Día	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	MEDIA
TRNSYS	5.13	4.28	5.38	5.54	0.71	2.99	2.67	0.43	0.48	0.33	2.79
DOE-2	18.05	18.81	20.76	19.83	2.30	5.06	4.20	12.61	17.30	16.41	13.53

ERROR PORCENTUAL DIARIO (T Min)											
Día	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	MEDIA
TRNSYS	8.57	7.60	7.15	7.35	1.43	0.83	2.93	1.85	0.81	3.71	4.22
DOE-2	1.08	4.63	5.99	5.46	12.59	5.73	7.03	11.78	2.67	2.25	5.92

VALOR MEDIO											
Día	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	MEDIA
TRNSYS	21.76	22.19	22.85	23.00	20.44	19.83	19.70	18.60	18.27	19.02	20.56
DOE-2	22.80	23.65	24.60	24.55	19.50	19.45	18.95	18.85	19.95	20.90	21.30
MEDICIONES	20.41	20.99	21.53	21.63	20.39	19.45	19.16	18.50	18.38	19.38	19.98

DESVIACIÓN MEDIA*											
Día	15	16	17	18	20	21	22	23	24	25	MEDIA
TRNSYS	2.64	2.65	2.63	2.54	1.99	1.54	1.10	2.09	2.27	1.88	2.13
DOE-2	4.80	4.65	4.60	4.45	3.60	2.35	2.15	4.55	4.25	3.50	3.89
MEDICIONES	2.80	2.83	2.66	2.57	2.20	1.31	1.09	2.29	2.25	1.58	2.16

Tabla 7.8.5 Diferentes características de las salidas de los modelos, comparadas con los datos medidos.

Al obtener el error porcentual medio, se observó que TRNSYS 13.1 concuerda de manera **EXCELENTE** con las mediciones para las temperaturas máximas, teniendo un error porcentual medio de 2.7%, mientras que en las temperaturas mínimas el error aumenta a 4.22%, considerando como una concordancia **BUENA** en este rubro.

DOE-2.1E, al contrario de TRNSYS 13.1, concuerda en mayor medida en las temperaturas mínimas que en las máximas, sin embargo el grado de precisión lo ubica como un programa **BUENO** al

predecir las temperaturas mínimas con un error porcentual de 5.92% y como **MALO** en las estimaciones de las temperaturas máximas, teniendo un error porcentual de 13.53%.

A pesar de las observaciones realizadas hasta aquí, se decidió hacer una nueva comparación tomando el valor medio de las temperaturas, pues en la gráfica 7.6.1 es notable que las estimaciones de DOE-2.1E oscilan alrededor de las mediciones, por lo que es de esperarse que en las temperaturas medias el error existente entre las predicciones del modelo y las mediciones sea menor.

Al analizar los valores medios diarios de las temperaturas así como el valor medio de toda la simulación, en la tabla 7.7.5 se puede ver que DOE-2.1E está muy cerca de las mediciones, siendo la diferencia media de todo el periodo de 1.32°C . Si se tomara la escala propuesta por Lomas, esta diferencia colocaría a DOE-2.1E como un programa con una concordancia excelente, pues el error es menor de 1.5°C , pero las condiciones son diferentes. No obstante, se puede decir que DOE-2.1E es preciso a nivel de temperaturas medias, pero si que quiere tener información horaria no es conveniente.

En este sentido TRNSYS 13.1 sí puede ser considerado como un programa muy preciso, pues en el error medio que presenta a nivel de temperaturas medias es de 0.58°C , es decir, muy cercano a la realidad.

7.8 CONCLUSIONES

Al analizar las salidas obtenidas con los dos modelos de simulación estudiados en el presente capítulo, es posible determinar conclusiones desde dos puntos de vista diferentes. Por una parte, se encuentran las características de operación de los programas, de las cuales depende principalmente su facultad de aplicación. En segundo lugar, las conclusiones también se pueden dar en base a la precisión de los modelos, tomando en cuenta que las características presentadas en este análisis son muy particulares y por lo tanto deben ser consideradas con ciertas reservas.

7.8.1 Operación de los Modelos

- Algunas entradas requeridas por TRNSYS 13.1 deben ser introducidas a criterio del usuario (ventilación, infiltración, etc.) y no existen parámetros adecuados en los manuales que guíen al usuario para determinar los valores de dichas entradas, dando lugar a la existencia de un margen de error en las entradas.
- DOE-2.1E presenta más información que TRNSYS 13.1 en los manuales para guiar al usuario en la determinación de las entradas, pero aún así, tiene algunas limitantes (por ejemplo, el intercambio de aire entre los espacios). No obstante, es posible hacer suposiciones para aproximar la descripción del edificio a la situación real.
- En ambos modelos es necesario hacer suposiciones que ayuden a simplificar la descripción de los edificios (ejem. muros adiabáticos, itinerarios de uso, etc.)
- Debido a las características anteriores, los dos modelos requieren cierta experiencia por parte del usuario para poder llevar a cabo simulaciones adecuadas.

- TRNSYS 13.1, por ser modular, demanda mayor experiencia por parte del usuario para poder estructurar el archivo de simulación o *deck*, incluyendo los *types* necesarios (ejem., parteluces, muros trombe, invernaderos, etc.), a diferencia de DOE-2.1E, que siempre presenta la misma secuencia para su descripción.
- DOE-2.1E, por estar diseñado expresamente para la simulación de edificios, en ocasiones requiere información más detallada que TRNSYS 13.1.
- Con la actual disposición de datos meteorológicos en la República Mexicana, sólo es posible la aplicación de TRNSYS 13.1, pues DOE-2.1E requiere información que no registran los observatorios, sin embargo, si se cuenta con un adecuado procesador de datos climáticos, DOE-2.1E también puede ser utilizado sin mayor problema.
- En ambos programas existe un “período de calentamiento”. En DOE-2.1E este periodo es simulado por el programa automáticamente, pero en TRNSYS 13.1 no, por lo cual es conveniente correr el programa durante siete días previos al período de interés; de este modo, las salidas de TRNSYS 13.1 no dependen de la temperatura asignada inicialmente.

7.8.2 Características de Precisión.

Antes de concluir con que precisión presentan los dos modelos estudiados sus salidas, es conveniente tomar en cuenta algunos puntos que pueden influir directamente en las mismas.

En primer lugar, las propiedades térmicas de los materiales pueden variar drásticamente dependiendo a la fuente donde sean consultadas, pero incluso si se tuviera un solo valor, en la realidad existen factores que pueden cambiar las propiedades “estándar” indicadas, por ejemplo, la calidad en la

producción del material, su contenido de humedad al momento del análisis, la calidad de construcción del edificio, etc.

Sólo con respecto a las propiedades encontradas en la bibliografía, en un estudio realizado por Rojas M.³⁴, se mencionan rangos muy amplios para el mismo material. En la tabla 7.8.1 se muestran los rangos encontrados de los materiales contemplados en el edificio de la Universidad de Sonora, donde se llevaron a cabo las simulaciones previas.

MATERIAL	DENSIDAD kg/m³	CALOR ESPECÍFICO kJ/kg°C	CONDUCTIVIDAD W/m²°C
YESO	850 - 1440	0.804 - 1.00	0.240 - 0.64
MORTERO (<i>cem-are</i>)	1860 - 2130	0.89 - 1.00	0.721 - 2.33
TABIQUE COMÚN <i>ligero</i>	1300 - 1800	0.795 - 0.8	0.581 - 0.93
<i>pesado</i>	1800 - 2600	0.829 - 0.96	0.72 - 1.6
CONCRETO	2100 - 2400	0.653 - 1.00	0.54 - 1.9

Tabla 7.8.1 Rangos encontrados en diversas fuentes de las propiedades térmicas de algunos materiales (Fuente: Rojas, M.)³⁴.

Como se puede apreciar en la tabla 7.8.1, las propiedades de algunos materiales como la conductividad térmica en el concreto, pueden diferir hasta en más del 300%, de tal manera que su influencia en las salidas de los programas puede ser imperativa si no se sabe elegir adecuadamente.

Otro de los parámetros de entrada que en la realidad puede variar notablemente con respecto a las entradas, es el valor asignado a los itinerarios y al calor generado por las personas, pues es bien claro que el ser humano no se comporta como una máquina. Aún cuando se trate de un espacio de trabajo

donde se tienen itinerarios bien definidos, el metabolismo de las personas depende, entre otras cosas, de la edad y sexo, así como del estado de salud, nerviosismo, etc., de cada persona, de tal manera que entre mayor sea la cantidad de usuarios de un espacio, el margen de error en la estradas en este rubro se incrementa.

Como se ha mencionado anteriormente, en el edificio analizado en este capítulo cada espacio era usado solamente por una persona y se espera que por lo mismo. Este sea un factor mínimo de error, sin embargo, es conveniente mantener ciertas reservas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han establecido las siguientes conclusiones con respecto a la precisión de las salidas de los modelos.

- TRNSYS 13.1 presenta salidas muy acertadas considerando el coeficiente de convección exterior $h_o = 20.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, pero cuando este coeficiente depende de la velocidad de viento, las salidas del programa pueden diferir en gran medida de la realidad.
- DOE-2.1E muestra oscilaciones mayores a las presentadas en la realidad, pero su temperatura media gira alrededor de las mediciones.
- Aunque TRNSYS 13.1 concuerda excelentemente con los datos medidos, el retardo térmico estimado por el programa excede en promedio en 2 horas al real.
- DOE-2.1E presenta sus temperaturas máximas entre 2 y 3 horas más tarde de lo que sucede en realidad.

- TRNSYS 13.1 es más preciso que DOE-2.1E para estimar la temperatura que habrá dentro de un espacio, tanto en climas extremos como en climas templados.
- DOE-2.1E no es muy preciso en el cálculo horario de las temperaturas, pero a nivel de medias puede ser empleado adecuadamente.

Capítulo 8

CONCLUSIONES

Como resultado del análisis realizado en este trabajo, se han determinado algunas ventajas y desventajas que presentan los programas, así como algunas conclusiones, que como varían considerablemente debido a la estructura de los programas. Aquí se presentan primero para TRNSYS 13.1 y en segundo lugar para DOE2.1E.

8.1 TRNSYS 13.1

- Es necesario que el usuario esté muy bien relacionado en los temas referentes a la termodinámica de edificios, pues existen muchas variables que deben ser asignadas prácticamente de acuerdo a su criterio y pueden tener influencia directa en las salidas del programa.
- En el subprograma BID (TYPE 56), la descripción del edificio es hasta cierto punto sencilla, sólo se debe tener cuidado de introducir las entradas correctamente.
- En BID (TYPE 56), la asignación de la ventilación e infiltración es muy subjetiva, ya que se deben indicar en cambios de aire por hora, quedando prácticamente a criterio del usuario.
- Las salidas pueden ser difíciles de interpretar de primera mano, pues aparecen en notación científica, sin embargo, se pueden procesar en otros programas para hacer los resultados más claros, aunque esto requiere más tiempo de trabajo.
- Aún en la modalidad más detallada (TYPE 56), el número de elementos que se pueden simular es muy limitado, siendo necesario, en edificios grandes o con muchos elementos, hacer simplificaciones y/o llevar a cabo la simulación como si fueran dos o más edificios.

- El formato en que se trabaja en TRNSYS 13.1 es muy rígido y no existen programas de pre o post-procesamiento diseñados expresamente para que el programa sea más accesible y/o “amigable”.
- Con las fuentes de datos y bibliografía existente en la República Mexicana, es posible correr TRNSYS 13.1 en sus distintas modalidades, ya que contiene procesadores de datos climáticos capaces de generar los datos horarios a partir de los formatos disponibles.
- Al trabajar con el TYPE 56, es conveniente asignar el valor del coeficiente de convección exterior (h_o) como un valor constante = $20.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, correspondiente a una velocidad de viento de 4 m/s, con lo cual se observan mejores resultados que si se modifica de acuerdo a la velocidad de viento.
- En climas templados, el valor que se asigne a la resistencia térmica del aire, dentro de los rangos establecidos por la ASHRAE⁹, no afecta de manera visible a la temperatura interior del espacio.
- Los valores que puede adquirir el coeficiente de convección interior, tampoco afectan notablemente la temperatura del interior del espacio.
- El valor de la infiltración afecta en gran medida a la temperatura interior cuando se asigna un valor alto, ya que opera durante las 24 horas, teniendo influencia directa de la temperatura del aire exterior.
- El valor de la ventilación, en el TYPE 56, afecta al espacio durante el periodo en que opera, pero en cuanto se elimina, la temperatura del aire interior tiende a estabilizarse, llegando a ser casi igual que si no existiera ventilación.
- El valor que se asigne al intercambio de aire con espacios adyacentes no tiene gran importancia cuando estos se encuentran bajo las mismas condiciones térmicas.

- Es conveniente permitir al programa correr durante 7 días antes de considerar validas las salidas. Este sería el “período de calentamiento” en TRNSYS 13.1.
- En el TYPE 56 se puede simular un solo espacio y se pueden obtener prácticamente las mismas salidas que si se simula todo el edificio, asignando las entradas correctas así como las suposiciones pertinentes.
- TRNSYS, por ser modular, demanda mucha experiencia por parte del usuario para poder estructurar adecuadamente una simulación.
- Las librerías comprendidas en el programa no son aplicables a la República Mexicana, sin embargo, los datos necesarios se pueden conseguir o generar.
- El procesador de clima está generado a partir de correlaciones de climas principalmente templados, por lo que su uso para generar datos horarios de climas muy diferentes no es muy recomendable.
- TRNSYS 13.1 sólo permite simular un período en un año, de la duración que el usuario la requiera, presentado los datos en los intervalos de tiempo que al usuario convenga.
- La ayuda que presenta el programa al encontrar errores es prácticamente nula, limitándose casi exclusivamente a indicar la ubicación de los errores, pero sin indicar detalladamente en que consisten, haciendo muy laboriosa su identificación.
- Aunque existen varios formatos para la presentación de resultados, la interpretación de los mismos, de primera mano, suele ser complicada, pues los valores aparecen en notación científica, siendo más conveniente depurarlos y procesarlos en programas alternos que permitan una mejor visualización.
- Tiene la ventaja de poder incluir comentarios dentro de los archivos de simulación, con los cuales se puede hacer un poco más clara la interpretación de las entradas.

- TRNSYS 13.1 presenta salidas muy acertadas considerando el coeficiente de convección exterior $h_o = 20.9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, pero cuando este coeficiente depende de la velocidad de viento, las salidas del programa pueden diferir en gran medida de la realidad.
- Aunque TRNSYS 13.1 concuerda excelentemente con los datos medidos, el retardo térmico estimado por el programa excede en promedio en 2 horas al real.
- El TYPE 19 no es flexible en cuanto a las entradas y es muy laboriosa la introducción de datos, principalmente cuando se emplean los coeficientes de transferencia de calor b, c y d, generados con el subprograma PREP.
- La determinación de las entradas en el TYPE 19 es muy rígida y no es posible asignar itinerarios para algunos parámetros como la ventilación, los cuales influyen drásticamente en los resultados.
- Si se quiere hacer una simulación rápida, se puede emplear el TYPE 12 de TRNSYS 13.1, de una manera muy sencilla, pero los resultados presentan poca precisión en los datos horarios, siendo conveniente su uso únicamente para obtener valores medios.

8.2 DOE-2.1E

- La descripción de los edificios sólo debe ser de acuerdo al orden secuencial mostrado en los manuales, por lo que no presenta mayor dificultad en este sentido.
- Aunque en los manuales se proporcionan los criterios adecuados para guiar al usuario en la determinación de las entradas, es muy conveniente que se esté familiarizado con la termodinámica de edificios, pues pueden existir características que no sean describibles fácilmente.

- La interpretación de las entradas es hasta cierto punto fácil, ya que los comandos y palabras clave sugieren el tipo de la entrada.
- Las librerías que contiene el programa no son aplicables en México, a no ser que se hagan aproximaciones, lo cual no es muy recomendable.
- Los procesadores de datos climáticos contenidos en DOE-2.1E no son capaces de generar todos los datos necesarios por el programa para realizar una simulación a partir de las fuentes disponibles en la República Mexicana, por lo que, de no contar con otros procesadores de datos, la aplicación del programa es imposible.
- DOE-2.1E tiene una gran cantidad de comandos y palabras clave que permiten adecuar los formatos a conveniencia del usuario.
- DOE-2.1E permite simular varios periodos aislados dentro de un año en una misma simulación, pero las salidas sólo las puede generar en intervalos mínimos de 1 hora.
- No proporciona suficiente información en cuanto a los errores que se presentan en los archivos de simulación, quedando a cargo del usuario su identificación.
- Aunque tiene más opciones de salidas que TRNSYS 13.1, la interpretación de éstas también suele ser complicada.
- Permite incluir comentarios en los archivos de simulación que ayuden al usuario en la comprensión de las entradas y/o salidas.
- La descripción del edificio es compleja debido a que todos los elementos que componen la estructura se deben describir en base a ejes cartesianos, sin embargo, esta es una ventaja, ya que algunas propiedades de elementos estructurales como sombreado, etc., sólo se hacen con comandos y/o palabras clave.

- Presenta varios modos para describir las entradas de algunos parámetros como infiltración, ganancias de calor por iluminación, etc.
- Puede simular edificios muy complejos compuestos de muchos elementos y/o zonas térmicas.
- Permite obtener una gran cantidad de salidas muy específicas
- Tiene la facultad de incorporar programas de pre y post-procesamiento diseñados expresamente para DOE-2.
- En cuanto a la precisión de las salidas, muestra oscilaciones térmicas en el interior del espacio mucho más amplias que las observadas en la realidad, tanto en climas extremosos como en templados.
- Cuando la velocidad del viento es fuerte en el exterior, las salidas se aproximan más a los datos medidos (es posible que si se pudiera asignar un valor constante al coeficiente de convección exterior como en el caso de TRNSYS 13.1, las salidas se acerquen más a los datos medidos).
- DOE-2.1E muestra oscilaciones mayores a las presentadas en la realidad, pero su temperatura media gira alrededor de las mediciones.
- DOE-2.1E presenta sus temperaturas máximas entre 2 y 3 horas más tarde que lo sucede en realidad.
- DOE-2.1E no es muy preciso en el cálculo horario de las temperaturas, pero a nivel de medias puede ser empleado adecuadamente.

GLOSARIO

Absortancia. Capacidad de un material para absorber energía radiante.

Adiabático. Proceso en el cual un fluido cambia de estado sin recibir ni transmitir calor.

Albedo. Factor de reflexión de una superficie; expresado en %.

Amortiguamiento térmico. Relación que existe entre la temperatura máxima interior de un espacio con la temperatura máxima exterior.

Año tipo. Año de registros climatológicos de una localidad que resulte significativo de un período que abarque por lo menos 10 años.

Calor específico. Cantidad de energía requerida para elevar un grado centígrado la temperatura de una sustancia.

Capacidad calorífica. Capacidad de calor que puede almacenar un cuerpo o material por unidad de volumen o de masa.

Conducción. Transferencia de calor a través de un cuerpo o de cuerpos en contacto directo.

Conductancia térmica. Transmisión térmica en unidad de tiempo a través de una unidad de área de un cuerpo en particular.

Convección. Transferencia de calor entre un medio fluido en movimiento y una superficie, o transferencia de calor dentro de un fluido por los propios movimientos de éste.

Densidad. Masa de una sustancia que se expresa en kg por m³.

Día Grado. Medida que indica la diferencia entre la temperatura de confort máxima o mínima y la temperatura media, de tal forma que la suma mensual de los valores diarios de esas diferencias dan los días-grado/mes.

Emisividad. Capacidad de una sustancia para emitir energía radiante; se produce por la relación del flujo de energía que emite un cuerpo con respecto al que emite un cuerpo negro ideal a la misma temperatura.

Energía. Capacidad de un cuerpo para efectuar un trabajo; toma diferentes formas: mecánica, eléctrica, química, etc.

Entalpía. Magnitud termodinámica de un cuerpo.

Humedad. Cantidad de vapor de agua en un volumen de aire.

Humedad absoluta. Peso del vapor de agua por unidad de volumen.

Humedad relativa. Cantidad de vapor de agua existente en el aire con relación a la máxima cantidad de vapor de agua que puede tener para saturarse a la misma temperatura.

Inercia térmica. Dimensión que introduce un retraso en la transmisión de un flujo de calor por una pared

Infiltración. Entrada de aire involuntaria de magnitudes pequeñas que se lleva a cabo a través de las rendijas de un edificio y se debe a las diferencias de presión entre el interior y el exterior, causadas por los vientos y la diferencia de temperatura.

Insolación. Intensidad de radiación que recibe una superficie terrestre expuesta a los rayos solares.

Intercambiador de calor. Dispositivo para intercambiar calor entre dos fluidos separados físicamente.

Latitud. Una de las coordenadas geográficas que determinan la ubicación de un punto sobre la superficie terrestre; indica la línea del Ecuador y los trópicos de Cáncer (paralelo de latitud $23^{\circ}27'N$) y de Capricornio ($23^{\circ}27'S$); es el límite de las zonas tropicales y subtropicales.

Longitud. Coordenada geográfica que indica la posición de los meridianos. Las longitudes son líneas que se juntan en los dos polos y cruzan e Ecuador.

Masa térmica. Valor de la capacidad potencial de almacenamiento de calor en un conjunto o sistema.

Meteorología. Se encarga del estudio cotidiano de los fenómenos atmosféricos según sus causas físicas.

Oscilación. Diferencia entre los valores máximos y mínimos registrados de un parámetro.

Oscilación térmica. Diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado de la temperatura.

Peso específico. Relación existente entre el peso de un cuerpo y su volumen.

Período transitorio. Aquel que toma en cuenta una serie de parámetros que varían con el tiempo.

Propiedades termodinámicas. Propiedades básicas que definen el estado de una sustancia (presión, temperatura, volumen, entalpía, etc.).

Psicrómetro. Instrumento para determinar la humedad o el estado higrométrico de la atmósfera.

Radiación. Transporte directo de energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.

Radiación solar. Radiación que proviene del Sol y que se encuentra entre el intervalo de longitudes de onda de 0.3 a 3 micras.

Radiación solar difusa. Radiación que se recibe del Sol después de un cambio de dirección debido a la reflexión o a la dispersión por la atmósfera, nubes o algunas superficies.

Radiación solar directa. Radiación que se recibe del Sol, sin que se exista algún cambio de dirección de los rayos.

Radiación térmica. Transferencia de calor de un objeto a otro, sin necesidad de un medio físico para transmitirse.

Reflectancia. Fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie.

Reflexión. Consiste en la retransmisión en otra dirección de la radiación incidente en una superficie sin alterar su energía.

Régimen permanente. Se da cuando las condiciones de determinado fenómeno no cambian con el tiempo.

Resistencia Térmica. Propiedad que tienen los materiales de oponerse al paso del calor.

Retardo. Es el tiempo transcurrido entre la absorción de energía solar por un material y su cesión al ambiente.

Temperatura. Cantidad de calor de un cuerpo.

Temperatura del aire. Estado de la atmósfera según los diversos grados de calor o humedad.

Temperatura de bulbo húmedo. Temperatura que se alcanza en estado estacionario para una pequeña cantidad de líquido en fase de evaporación dentro de una mezcla gas-vapor no saturada.

Temperatura de bulbo seco (ambiente). Media aritmética de los promedios mensuales y anuales de la temperatura al ambiente, que se calcula con los datos del período.

Trasmitancia. Capacidad de un material para transmitir energía radiante.

Zona de confort. Estado psicofisiológico bajo el cual la mayoría de los usuarios de un espacio manifiestan satisfacción con el medio ambiente que les rodea.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Judkoff, R.D.; Neymark, J.S., 1995 "A Procedure For Testing The Ability Of Whole Building Energy Simulation Programs To Thermally Model The Building Fabric.", ASME Journal of solar Energy Engineering , Vol 117, pp 7-15
- ² Sheinbaum P. Claudia, 1994. "Tendencias y Perspectivas de la Energía Residencial en México". Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
- ³ Judkoff, R.D.; Neymark, J.S., 1995 "Home Energy Rating Systems. Building Energy Simulation Test" (HERS BESTEST). Volume 1, Tier 1 and Tier 2 Test. Users Manual. National Renewable Energy Laboratory (NREL). U.S. Department of Energy. Golden, CO.
- ⁴ Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), 1995, "Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-1995". Secretaría de Ahorro de Energía, México, D.F. (Documento no oficial hasta su publicación en el Diario Oficial de la Federación).
- ⁵ Fuentes F.V. , et al. 1991 "Manual de Arquitectura Solar" Edit. TRILLAS, México.
- ⁶ Szokolay, S.V. 1980. "Environmental Science Handbook for Architects and Builders". The Construction Press Ltd. Lancaster, England.
- ⁷ Kreider, Jan and Rabl, Ari. 1993 "Heating and Cooling of Buildings". Design for Efficiency. Mc. Grow Hill, Princeton Road, Hightstown, N.J.
- ⁸ Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), "Guía para Aplicar Criterios de Eficiencia Energética en Construcciones para Uso Habitacional". México, D.F.
- ⁹ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993, "1993 ASHRAE Handbook of Fundamentals", Atlanta, GA.
- ¹⁰ Morales R.D., et al. "Estudio para el Ahorro de Energía en Edificios para la Ciudad de México". Facultad de Arquitectura e Instituto de Geofísica de la UNAM. Próxima publicación.
- ¹¹ Judkoff, R., Neymark, J., 1995. "Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method: A Procedure For Testing The Ability Of Whole Building Energy Simulation Programs To Thermally Model The Building Fabric", (draft) IEA Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.
- ¹² Bansal N.K and Bhandary M.S., 1996. "Comparison of the Periodic Solution Method with TRNSYS and SUNCODE for Thermal Building Simulation". Solar Energy Vol. No. 1, pp. 9-18. Great Britain.

- ¹³ Eppel, Herbert. 1995. "Empirical Validation of Three Thermal Simulation Programs using Data from a Passive Solar Building". ECADAP Centre, Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University Leicester. Thesis Work.
- ¹⁴ Fernández A., y Morales, J.D., 1996, "Evaluación y Comparación de Tres Métodos Distintos de Simulación Térmica con Base en los Resultados Obtenidos Tras la Medición de Parámetros Interiores en Tres Puntos Distintos de una Edificación" Memoria de la XX Semana Nacional de Energía Solar, Xalapa, Ver.
- ¹⁵ Bloomfield, D.P., Lomas, K.J., Martin, C.J., 1992 "Assessing Programs which Predict the Thermal Performance of Buildings", BRE Information Paper IP 7/92, 3pp.
- ¹⁶ Meldem R. and Winkelmann F. 1995 "Comparison of DOE-2 with Measurements in the Pala Test Houses". Energy & Environment Division. Lawrence Berkeley Laboratory. University of California. Berkeley, CA.
- ¹⁷ Fernández, A., 1996. "Climatización Natural de una vivienda en San Pedro Mátrir, Tlalpan, D.F.", Tesis de Especialización, U.N.A.M., México.
- ¹⁸ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1981, "1981 ASHRAE Handbook of Fundamentals", Atlanta, GA.
- ¹⁹ Sámano, D.A., Vázquez B. Y Morales D. 1994, "Carga Térmica en un Edificio con Almacenamiento Térmico". Notas del Curso de Actualización en Heliarquitectura Urbana. Asociación Nacional de Energía Solar. Morelia, Mich. Octubre de 1989.
- ²⁰ Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 1991. "TRNSED", User's Manual.
- ²¹ Klein, S.A., et al., 1992, "TRNSYS" v. 13.1, Users Manual. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin, USA.
- ²² American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1977, "1977 ASHRAE Handbook of Fundamentals", Atlanta, GA.
- ²³ Mitalas, G.P. and Stephenson, D.G. 1967 "Room Thermal Response Factors" ASHRAE Transactions 73(2):III.2.1
- ²⁴ Erbs, D.G. 1980 "Methods for Estimating the Diffuse Fraction of Hourly, Daily and Monthly Average Global Solar Radiation", Masters Thesis in Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison.
- ²⁵ Liu, B.Y.H and Jordan, R.C. "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation". Solar Energy, Vol. IV, July 1960, pp. 1-19.

²⁶ Boes, E.C. et al. 1976 "Distribution of Direct and Total Solar Radiation Availabilities for the U.S.A.", Sandia Report SAND76-0411, August, 1976.

²⁷ Reindl, D.T., Beckmann, W.A. and Duffie, J.A., 1990. "Diffuse Fraction Correlations", Solar Energy, Vol.45, No. 1, 1990, pp.1-7.

²⁸ Mitalas, G.P., Arsenault, J.G., "FORTRAN IV Program to Calculate z-Transfer Functions for the Calculation of Transient Heat Transfer Through Walls and Roofs", Division of National Research Council of Canada, Ottawa.

²⁹ Normales Climatológicas. Datos disponibles en el Observatorio Meteorológico Nacional.

³⁰ Tejeda, M.A., et al. 1991. "Atlas Solar de la república Mexicana". Textos Universitarios. Universidad Veracruzana y Universidad de Colima. México.

³¹ Almanza et al., 1992 "Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana". Series del Instituto de Ingeniería No. 543. Septiembre 1992. Instituto de Ingeniería UNAM.

³² Fernández, Z.J. et al. 1983. "Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana", Series del Instituto de Ingeniería No. 472. Octubre 1983. Instituto de Ingeniería UNAM.

³³ Galindo E.I. et al. "Irradiación Solar Global en la República Mexicana". Programa Universitario de Energía. Coordinación de la Investigación Científica. Universidad Nacional Autónoma de México.

³⁴ Rojas, M. J. "Obtención de Propiedades Ópticas, Térmicas y Físicas de algunos Materiales de Construcción". Tesina. Instituto de Investigaciones en Materiales, Laboratorio de Energía Solar, Posgrado en Energía Solar. UNAM.

Bibliografía Adicional

Birdsall, W.F. et al., 1990 "Overview Of The DOE-2. Building Energy Analysis Program. Version 2.1D." Simulation Research Group. Lawrence Berkeley Laboratory. University of California. Berkeley, California.

Hinojosa, J.F., Cabanillas, R.E., 1994, "Simulación Térmica de un Edificio en una Región de Clima Cálido-Seco". Memoria de la XVIII Semana Nacional de Energía Solar, Hermosillo, Son.

Lawrence Berkeley National Laboratory. 1996 "User News" Building Energy Simulation. Vol. 17, No. 4 - Winter 1996. PUB-439. Simulation Research Group, LBNL and BLAST Support Office, University of Illinois.

Mazria, E. 1985. "El libro de la Energía Solar Pasiva". Tecnología y Arquitectura. Construcción Alternativa. Edit. Gustavo Gili. México.

Rodríguez T., J. Y Baltazar C. J., 1997.. "Transferencia de Calor". Notas del curso de Diseño Bioclimático de Edificios. XXI Semana Nacional de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). Chihuahua, Chi.

Tudela, F., 1982. "Ecodiseño". Colección Ensayos. Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco. México, D.F.

United States Agency For International Development, 1997. Notas del Taller "Eficiencia Energética en Edificios: Códigos y Estándares". Institute of International Education y Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. México, D.F.

Winkelmann, F.C., et al., 1993. "DOE-2 Supplement, Version 2.1E". Lawrence Berkeley Laboratory.

York, D.A., Tucker, E.F., Capiello, C.C., 1981, "DOE-2 Reference Manual" (version 2.1A), Parte 1. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM 87545.

York, D.A., Tucker, E.F., Capiello, C.C., 1981, "DOE-2 Reference Manual" (version 2.1A), Parte 2. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM 87545

ANEXO A

**CORRIDAS REALIZADAS CON TRNSYS 13.1
EN LA HABITACIÓN DE MÉXICO, D.F.**

TRANSYS - A TRANSIENT SIMULATION PROGRAM
FROM THE SOLAR ENERGY LAB AT THE UNIVERSITY OF WISCONSIN
VERSION 13.1 LATE 1990

ASSIGN	COPIL192.OUT	6
ASSIGN	COPILC97.DAT	20
ASSIGN	ASHRAE.COF	8

WIDTH 72

BALANCE TERMICO DE UNA HABITACION EN COPILCO
UTILIZANDO EL TYPE 19.

DATOS DE CLIMA PROPORCIONADOS CON EL TYPE 9
DECK ELABORADO POR FERNANDO VELASCO MONTIEL

UNIT	1	TYPE	9	LECTURA DE DATOS CLIMATICOS		
PARAMETERS	22					
9.000E+00		1.000E+00		-4.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
-5.000E+00		1.000E+00		0.000E+00	-6.000E+00	1.000E+00
0.000E+00		-7.000E+00		1.000E+00	0.000E+00	-8.000E+00
1.000E+00		0.000E+00		-9.000E+00	1.000E+00	0.000E+00
2.000E+01		0.000E+00				

```

UNIT 2 TYPE 33 DATOS PARA EL DIAGRAMA PSICROMETRICO
PARAMETERS 4
2.000E+00 1.000E+00 7.500E-01 1.000E+00
INPUTS 2
1,4 1,5
0.000E+00 0.000E+00

```

UNIT 3	TYPE 16	PROCESADOR DE RADIACION			
PARAMETERS 8					
5.000E+00	1.000E+00	3.000E+00	2.800E+02	1.915E+01	
1.367E+03	9.000E+00	1.000E+00			
INPUTS 14					
1,6	1,4	1,5	1,19	1,20	
CONST	CONST	CONST	CONST	CONST	
CONST	CONST	CONST	CONST		
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
4.000E-01	9.000E+01	1.800E+02	9.000E+01	-9.000E+01	
9.000E+01	9.000E+01	5.000E-01	0.000E+00		

UNIT 8	TYPE 19	BALANCE TERMICO DETALLADO			
*ZONA					
PARAMETERS 10					
2.000E+00	1.000E+00	2.612E+01	3.000E-01	5.000E-01	
5.000E-01	5.000E+02	7.000E+00	2.380E+01	1.237E-02	
INPUTS 11					
1,4	2,1	CONST	CONST	2,1	
CONST	1,8	CONST	1,9	CONST	
1,7					
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	
0.000E+00					

*MUROS

PARAMETERS 147

1.000E+00	3.000E+00	5.805E+00	3.500E-01	6.500E-01
4.000E+00	1.044E-01	5.000E+00	5.000E+00	3.000E+00
2.463E+00	1.158E+01	2.508E+00	1.681E-02	6.000E-07
8.823E+01	-8.319E+01	1.163E+01	-9.400E-02	4.700E-06
1.000E+00	-3.594E-01	4.922E-03	2.000E+00	3.000E+00
9.675E+00	3.500E-01	6.500E-01	4.000E+00	1.044E-01
5.000E+00	5.000E+00	3.000E+00	2.463E+00	1.158E+01
2.508E+00	1.681E-02	6.000E-07	8.823E+01	-8.319E+01
1.163E+01	-9.400E-02	4.700E-06	1.000E+00	-3.594E-01
4.922E-03	3.000E+00	1.000E+00	4.845E+00	3.500E-01
6.500E-01	4.000E+00	1.044E-01	5.000E+00	5.000E+00
3.000E+00	2.463E+00	1.158E+01	2.508E+00	1.681E-02
6.000E-07	8.823E+01	-8.319E+01	1.163E+01	-9.400E-02
4.700E-06	1.000E+00	-3.594E-01	4.922E-03	4.000E+00
3.000E+00	7.740E+00	7.000E-01	3.000E-01	4.000E+00
1.044E-01	3.000E+00	3.000E+00	2.000E+00	5.756E+00
1.516E+00	6.800E-06	1.613E+01	-8.858E+00	1.269E-04
1.000E+00	2.700E-05	5.000E+00	3.000E+00	1.215E+01
7.000E-01	3.000E-01	4.000E+00	1.044E-01	5.000E+00
5.000E+00	4.000E+00	2.300E-01	1.632E+00	6.222E-01
1.281E-02	2.500E-06	6.038E+01	-7.314E+01	1.613E+01
-8.751E-01	5.470E-05	1.000E+00	-3.775E-01	3.399E-02
-2.800E-06	6.000E+00	1.000E+00	1.215E+01	7.000E-01
3.000E-01	4.000E+00	1.044E-01	9.000E+00	9.000E+00
8.000E+00	0.000E+00	4.760E-05	2.804E-03	1.485E-02
1.621E-02	4.598E-03	3.498E-04	6.500E-06	0.000E+00
6.537E+01	-1.947E+02	2.171E+02	-1.124E+02	2.768E+01
-3.147E+00	1.577E-01	-2.853E-03	1.150E-05	1.000E+00
-2.128E+00	1.585E+00	-5.138E-01	-7.579E-02	-4.721E-03
9.500E-06	-3.000E-07			

INPUTS 14

CONST	CONST	CONST	CONST	CONST
CONST	3,17	CONST	CONST	CONST
CONST	CONST	CONST	3,17	
2.320E+01	2.320E+01	0.000E+00	2.320E+01	2.320E+01
0.000E+00	0.000E+00	2.320E+01	2.320E+01	0.000E+00
2.320E+01	2.320E+01	0.000E+00	0.000E+00	

*VENTANAS

PARAMETERS 9

7.000E+00	5.000E+00	9.600E-01	1.000E+00	8.000E-01
1.000E+01	2.000E+00	4.000E+00	5.000E+00	

INPUTS 6

3,14	3,15	CONST	CONST	CONST
------	------	-------	-------	-------

CONST

0.000E+00	0.000E+00	8.000E-01	5.860E+00	5.000E-01
5.000E-01				

*FACTORES DE VISTA

PARAMETERS 17

1.000E+00	2.150E+00	2.700E+00	3.700E+00	1.000E+00
2.000E+00	3.000E+00	4.000E+00	5.000E+00	6.000E+00
1.000E+00	7.000E+00	3.000E+00	0.000E+00	9.000E-01
9.000E-01	1.075E+00			

UNIT 10 TYPE 28 RESULTADOS SUMARIOS

PARAMETERS 9

1.000E+00	0.000E+00	9.600E+01	-1.000E+00	2.000E+00
-1.100E+01	-4.000E+00	-1.200E+01	-4.000E+00	

INPUTS 2

8,1	1,4
-----	-----

LABELS 2

TINT	TAMB
------	------

UNIT 12 TYPE 26 GRAFICA DE TEMPERATURAS

PARAMETERS 4

1.000E+00	0.000E+00	9.600E+01	1.000E+00
-----------	-----------	-----------	-----------

INPUTS 2

8,1	1,4
-----	-----

TINT

TAMB

END

TRANSIENT SIMULATION STARTING AT TIME = 0.000E+00
 STOPPING AT TIME = 9.600E+01
 TIMESTEP = 1
 DIFFERENTIAL EQUATION ERROR TOLERANCE = 1.000E-02
 ALGEBRAIC CONVERGENCE TOLERANCE = 1.000E-02
DIFFERENTIAL EQUATIONS SOLVED BY MODIFIED EULER

VIEW FACTOR SUMMARY FOR UNIT 8 TYPE 19

I	J=	1	2	3	4	5	6	7
1		.000	.199	.088	.199	.248	.248	.018
2		.145	.000	.104	.205	.252	.252	.041
3		.106	.172	.000	.217	.260	.245	.000
4		.145	.205	.132	.000	.252	.252	.013
5		.144	.201	.126	.201	.000	.310	.018
6		.144	.201	.119	.201	.310	.000	.025
7		.107	.337	.000	.107	.186	.262	.000

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = .000 TO 12.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
1	1.000	2.322E+01	1.590E+01
2	2.000	2.233E+01	1.590E+01
3	3.000	2.175E+01	1.550E+01
4	4.000	2.129E+01	1.550E+01
5	5.000	2.084E+01	1.460E+01
6	6.000	2.052E+01	1.460E+01
7	7.000	1.994E+01	1.500E+01
8	8.000	1.916E+01	1.550E+01
9	9.000	1.887E+01	1.550E+01
10	10.000	1.897E+01	1.720E+01
11	11.000	1.937E+01	1.890E+01
12	12.000	1.996E+01	2.100E+01

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 12.000 TO 24.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
13	13.000	2.089E+01	2.230E+01
14	14.000	2.225E+01	2.400E+01
15	15.000	2.326E+01	2.480E+01
16	16.000	2.366E+01	2.400E+01
17	17.000	2.399E+01	2.310E+01
18	18.000	2.404E+01	2.230E+01
19	19.000	2.409E+01	2.140E+01
20	20.000	2.411E+01	2.010E+01
21	21.000	2.384E+01	1.970E+01
22	22.000	2.374E+01	1.890E+01
23	23.000	2.365E+01	1.890E+01
24	24.000	2.338E+01	1.800E+01

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 24.000 TO 36.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
25	25.000	2.308E+01	1.800E+01
26	26.000	2.285E+01	1.760E+01
27	27.000	2.261E+01	1.720E+01
28	28.000	2.240E+01	1.670E+01
29	29.000	2.222E+01	1.630E+01

30	30.000	2.214E+01	1.630E+01
31	31.000	2.156E+01	1.590E+01
32	32.000	2.063E+01	1.630E+01
33	33.000	2.014E+01	1.630E+01
34	34.000	2.005E+01	1.720E+01
35	35.000	2.026E+01	1.800E+01
36	36.000	2.068E+01	1.970E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 36.000 TO 48.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
37	37.000	2.151E+01	2.230E+01
38	38.000	2.244E+01	2.310E+01
39	39.000	2.315E+01	2.480E+01
40	40.000	2.361E+01	2.440E+01
41	41.000	2.380E+01	2.310E+01
42	42.000	2.379E+01	2.230E+01
43	43.000	2.389E+01	2.060E+01
44	44.000	2.392E+01	1.890E+01
45	45.000	2.359E+01	1.800E+01
46	46.000	2.332E+01	1.800E+01
47	47.000	2.302E+01	1.720E+01
48	48.000	2.268E+01	1.720E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 48.000 TO 60.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
49	49.000	2.234E+01	1.630E+01
50	50.000	2.200E+01	1.630E+01
51	51.000	2.193E+01	1.630E+01
52	52.000	2.190E+01	1.630E+01
53	53.000	2.185E+01	1.630E+01
54	54.000	2.194E+01	1.590E+01
55	55.000	2.154E+01	1.550E+01
56	56.000	2.067E+01	1.550E+01
57	57.000	2.017E+01	1.630E+01
58	58.000	2.009E+01	1.720E+01
59	59.000	2.029E+01	1.800E+01
60	60.000	2.070E+01	1.890E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 60.000 TO 72.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
61	61.000	2.143E+01	1.970E+01
62	62.000	2.201E+01	2.060E+01
63	63.000	2.258E+01	1.930E+01
64	64.000	2.297E+01	1.970E+01
65	65.000	2.273E+01	1.890E+01
66	66.000	2.227E+01	1.800E+01
67	67.000	2.203E+01	1.720E+01
68	68.000	2.209E+01	1.670E+01
69	69.000	2.206E+01	1.630E+01
70	70.000	2.205E+01	1.590E+01
71	71.000	2.202E+01	1.550E+01
72	72.000	2.198E+01	1.550E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 72.000 TO 84.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
--------------------	------	------	------

73	73.000	2.188E+01	1.500E+01
74	74.000	2.161E+01	1.460E+01
75	75.000	2.139E+01	1.460E+01
76	76.000	2.126E+01	1.460E+01
77	77.000	2.116E+01	1.460E+01
78	78.000	2.121E+01	1.460E+01
79	79.000	2.093E+01	1.460E+01
80	80.000	2.077E+01	1.700E+01
81	81.000	2.112E+01	1.720E+01
82	82.000	2.177E+01	1.970E+01
83	83.000	2.275E+01	2.060E+01
84	84.000	2.359E+01	2.100E+01

1

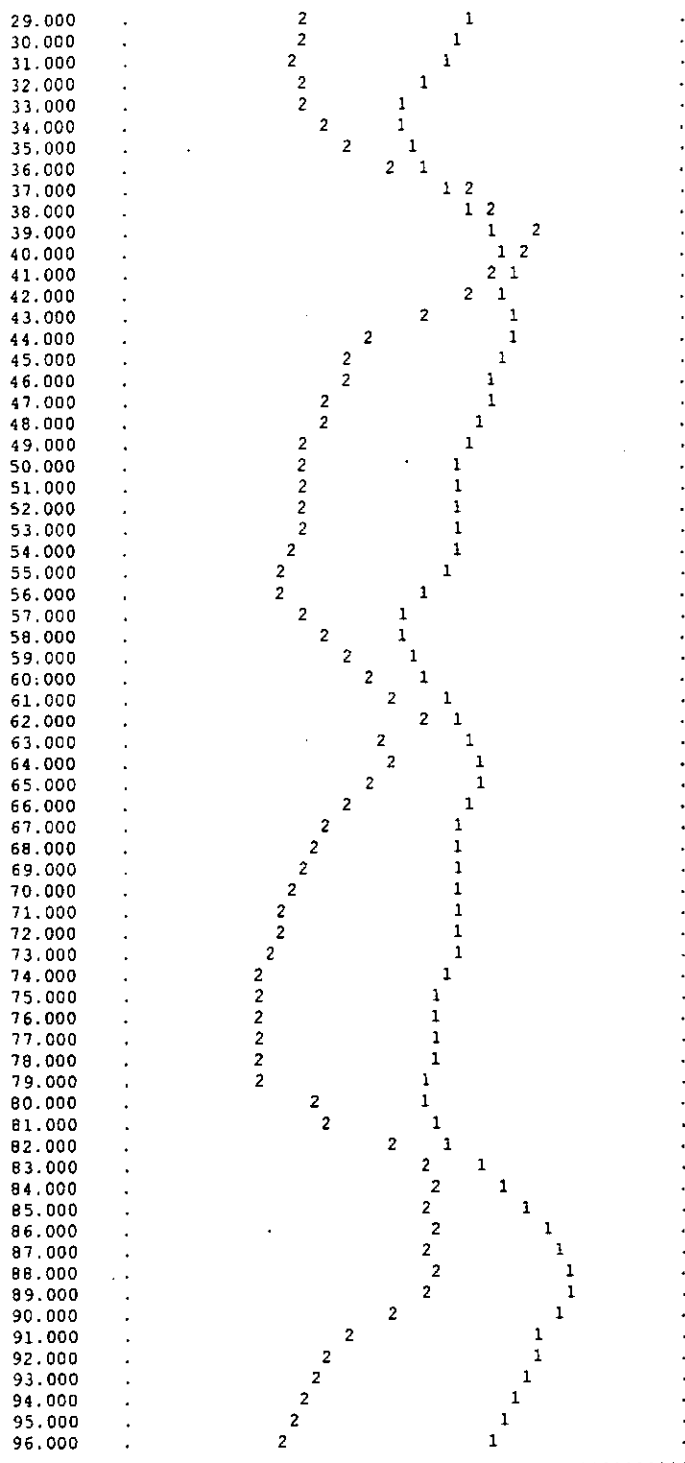
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 84.000 TO 96.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TINT	TAMB
85	85.000	2.439E+01	2.060E+01
86	86.000	2.501E+01	2.140E+01
87	87.000	2.554E+01	2.060E+01
88	88.000	2.591E+01	2.140E+01
89	89.000	2.584E+01	2.060E+01
90	90.000	2.542E+01	1.970E+01
91	91.000	2.496E+01	1.800E+01
92	92.000	2.471E+01	1.720E+01
93	93.000	2.441E+01	1.670E+01
94	94.000	2.408E+01	1.630E+01
95	95.000	2.369E+01	1.590E+01
96	96.000	2.337E+01	1.550E+01
SUM	96.000	2.143E+03	1.742E+03

UNIT	1	WAS CALLED	98	TIMES
	2		85	
	3		98	
	8		98	
	10		98	
	12		97	

1

	0.0		0.5		1.0
.000	I	...	I	...	I
1.000	.		2		1
2.000	.		2		1
3.000	.		2		1
4.000	.		2		1
5.000	.	2		1	
6.000	.	2		1	
7.000	.	2		1	
8.000	.	2		1	
9.000	.	2		1	
10.000	.		2	1	
11.000	.			21	
12.000	.			1	2
13.000	.			1	2
14.000	.				1
15.000	.				1
16.000	.				12
17.000	.				2
18.000	.				2
19.000	.				2
20.000	.				2
21.000	.				2
22.000	.				2
23.000	.				2
24.000	.				2
25.000	.				2
26.000	.				2
27.000	.				2
28.000	.				2



SYMBOL	IDENTIFIER	SCALE FACTOR	ZERO POINT	
	1	TINT	2.000E+01	1.000E+01
	2	TAMB	2.000E+01	1.000E+01

LIST

WIDTH 72

NOLIST

272

```

UNIT 5      TYPE 56      BALANCE TERMICO (TEMPERATURAS)
PARAMETERS  2
1.000E+01   1.100E+01
INPUTS  8
1,4         3,1         4,6         4,11        4,14
4,17        CONST      1,4
0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.000E+00   7.500E+01   0.000E+00

```

```

UNIT 6      TYPE 26      GRAFICA DE TEMPERATURAS
PARAMETERS  4
1.000E+00   0.000E+00   9.600E+01   1.000E+00
INPUTS  2
5,1         1,4
TRE1        TAMB

```

```

UNIT 8      TYPE 28      RESULTADOS SUMARIOS ZONA1
PARAMETERS  9
1.000E+00   0.000E+00   9.600E+01   -1.000E+00   2.000E+00
-1.100E+01  -4.000E+00  -1.200E+01  -4.000E+00
INPUTS  2
5,1         1,4
LABELS  2
TRE1        TAMB

```

END

```

TRANSIENT SIMULATION      STARTING AT TIME = 0.000E+00
                           STOPPING AT TIME = 9.600E+01
                           TIMESTEP = 1
DIFFERENTIAL EQUATION ERROR TOLERANCE = 1.000E-02
ALGEBRAIC CONVERGENCE TOLERANCE = 1.000E-02
DIFFERENTIAL EQUATIONS SOLVED BY MODIFIED EULER

```

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = .000 TO 12.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TRE1	TAMB
1	1.000	2.376E+01	1.590E+01
2	2.000	2.368E+01	1.590E+01
3	3.000	2.359E+01	1.550E+01
4	4.000	2.348E+01	1.550E+01
5	5.000	2.336E+01	1.460E+01
6	6.000	2.324E+01	1.460E+01
7	7.000	2.315E+01	1.500E+01
8	8.000	2.296E+01	1.550E+01
9	9.000	2.283E+01	1.550E+01
10	10.000	2.296E+01	1.720E+01
11	11.000	2.319E+01	1.890E+01
12	12.000	2.348E+01	2.100E+01

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 12.000 TO 24.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TRE1	TAMB
13	13.000	2.390E+01	2.230E+01
14	14.000	2.451E+01	2.400E+01
15	15.000	2.496E+01	2.480E+01
16	16.000	2.510E+01	2.400E+01
17	17.000	2.522E+01	2.310E+01
18	18.000	2.524E+01	2.230E+01
19	19.000	2.513E+01	2.140E+01
20	20.000	2.506E+01	2.010E+01

21	21.000	2.504E+01	1.970E+01
22	22.000	2.499E+01	1.890E+01
23	23.000	2.489E+01	1.890E+01
24	24.000	2.477E+01	1.800E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 24.000 TO 36.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TRE1	TAMB
25	25.000	2.465E+01	1.800E+01
26	26.000	2.454E+01	1.760E+01
27	27.000	2.443E+01	1.720E+01
28	28.000	2.431E+01	1.670E+01
29	29.000	2.420E+01	1.630E+01
30	30.000	2.408E+01	1.630E+01
31	31.000	2.400E+01	1.590E+01
32	32.000	2.382E+01	1.630E+01
33	33.000	2.363E+01	1.630E+01
34	34.000	2.367E+01	1.720E+01
35	35.000	2.379E+01	1.800E+01
36	36.000	2.398E+01	1.970E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 36.000 TO 48.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TRE1	TAMB
37	37.000	2.435E+01	2.230E+01
38	38.000	2.473E+01	2.310E+01
39	39.000	2.498E+01	2.480E+01
40	40.000	2.508E+01	2.440E+01
41	41.000	2.504E+01	2.310E+01
42	42.000	2.496E+01	2.230E+01
43	43.000	2.483E+01	2.060E+01
44	44.000	2.474E+01	1.890E+01
45	45.000	2.471E+01	1.800E+01
46	46.000	2.466E+01	1.800E+01
47	47.000	2.454E+01	1.720E+01
48	48.000	2.441E+01	1.720E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 48.000 TO 60.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TRE1	TAMB
49	49.000	2.428E+01	1.630E+01
50	50.000	2.415E+01	1.630E+01
51	51.000	2.403E+01	1.630E+01
52	52.000	2.391E+01	1.630E+01
53	53.000	2.380E+01	1.630E+01
54	54.000	2.369E+01	1.590E+01
55	55.000	2.361E+01	1.550E+01
56	56.000	2.343E+01	1.550E+01
57	57.000	2.322E+01	1.630E+01
58	58.000	2.319E+01	1.720E+01
59	59.000	2.325E+01	1.800E+01
60	60.000	2.336E+01	1.890E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 60.000 TO 72.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TRE1	TAMB
61	61.000	2.361E+01	1.970E+01
62	62.000	2.379E+01	2.060E+01

63	63.000	2.402E+01	1.930E+01
64	64.000	2.424E+01	1.970E+01
65	65.000	2.420E+01	1.890E+01
66	66.000	2.408E+01	1.800E+01
67	67.000	2.391E+01	1.720E+01
68	68.000	2.382E+01	1.670E+01
69	69.000	2.380E+01	1.630E+01
70	70.000	2.373E+01	1.590E+01
71	71.000	2.360E+01	1.550E+01
72	72.000	2.346E+01	1.550E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 72.000 TO 84.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TREI	TAMB
73	73.000	2.332E+01	1.500E+01
74	74.000	2.318E+01	1.460E+01
75	75.000	2.305E+01	1.460E+01
76	76.000	2.292E+01	1.460E+01
77	77.000	2.279E+01	1.460E+01
78	78.000	2.267E+01	1.460E+01
79	79.000	2.260E+01	1.460E+01
80	80.000	2.251E+01	1.700E+01
81	81.000	2.246E+01	1.720E+01
82	82.000	2.260E+01	1.970E+01
83	83.000	2.286E+01	2.060E+01
84	84.000	2.305E+01	2.100E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 84.000 TO 96.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TREI	TAMB
85	85.000	2.324E+01	2.060E+01
86	86.000	2.336E+01	2.140E+01
87	87.000	2.355E+01	2.060E+01
88	88.000	2.376E+01	2.140E+01
89	89.000	2.375E+01	2.060E+01
90	90.000	2.367E+01	1.970E+01
91	91.000	2.351E+01	1.800E+01
92	92.000	2.342E+01	1.720E+01
93	93.000	2.340E+01	1.670E+01
94	94.000	2.334E+01	1.630E+01
95	95.000	2.322E+01	1.590E+01
96	96.000	2.308E+01	1.550E+01
SUM	96.000	2.290E+03	1.742E+03

UNIT 1	WAS CALLED	98 TIMES
2		85
3		76
4		98
5		98
6		97
8		98

ANEXO B

**CORRIDAS REALIZADAS CON TRNSYS 13.1
EN EL LABORATORIO DE HERMOSILLO, SON.**


```

UNIT 4      TYPE 16      PROCESADOR DE RADIACION
PARAMETERS 8
5.000E+00  1.000E+00  3.000E+00  3.420E+02  2.904E+01
4.921E+03  5.800E+00  1.000E+00
INPUTS 14
1,6      1,4      1,5      1,19     1,20
CONST    CONST    CONST    CONST    CONST
CONST    CONST    CONST    CONST
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2.000E-01 9.000E+01 1.800E+02 9.000E+01 -9.000E+01
9.000E+01 9.000E+01 0.000E+00 0.000E+00

*
UNIT 5      TYPE 34      PARTELUZ y ALERO de VENTANA1 WOESTE
PARAMETERS 15
* h w p g el er PL gL et,l eb,l PR gr et,r eb,r azimuth
5.000E-01 1.080E+01 2.400E+00 0.000E+00 1.710E+01
1.500E-01 2.400E+00 1.710E+01 0.000E+00 4.900E+00
2.400E+00 1.500E-01 0.000E+00 4.900E+00 9.000E+01
INPUTS 6
4,2      4,3      4,4      4,5      4,17
CONST
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2.000E-01

*
UNIT 6      TYPE 34      PARTELUZ y ALERO de PARED1 MOESTE
PARAMETERS 15
* h w p g el er PL gL et,l eb,l PR gr et,r eb,r azimuth
1.750E+00 1.296E+01 2.400E+00 5.000E-01 1.695E+01
0.000E+00 2.400E+00 5.000E-01 5.000E-01 5.000E-01
2.400E+00 5.000E-01 5.000E-01 3.150E+00 9.000E+01
INPUTS 6
4,2      4,3      4,4      4,5      4,17
CONST
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
2.000E-01

*
UNIT 56     TYPE 56      BALANCE TERMICO (TEMPERATURAS)
PARAMETERS 2
1.000E+01 1.100E+01
INPUTS 10
*tamb hr IN IS IE IMO IWO I HOUT TAMB
1,4      3,1      4,6      4,11     4,14
6,1      5,1      4,4      CONST    1,4
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 7.500E+01 0.000E+00

*
*UNIT 26 TYPE 26 GRAFICA DE TEMPERATURAS
*PARAMETERS 4
*1 HRINI HRFIN 1
*INPUTS 3
*56,4 1,9 1,4
*TCUB3 TMED TAMB

*
UNIT 28     TYPE 28      RESULTADOS SUMARIOS ZONA1
PARAMETERS 9
1.000E+00 0.000E+00 4.320E+02 -1.000E+00 2.000E+00
-1.100E+01 -4.000E+00 -1.200E+01 -4.000E+00
INPUTS 2
56,4      1,4
LABELS 2
TCUB3      TAMB

*
END

```

```

TRANSIENT SIMULATION      STARTING AT TIME - 0.000E+00
                          STOPPING AT TIME - 4.320E+02
                          TIMESTEP = 1

```

DIFFERENTIAL EQUATION ERROR TOLERANCE = 1.000E-02
 ALGEBRAIC CONVERGENCE TOLERANCE = 1.000E-02
 DIFFERENTIAL EQUATIONS SOLVED BY MODIFIED EULER

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = .000 TO 12.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
1	1.000	2.163E+01	1.657E+01
2	2.000	2.152E+01	1.667E+01
3	3.000	2.138E+01	1.622E+01
4	4.000	2.122E+01	1.565E+01
5	5.000	2.104E+01	1.575E+01
6	6.000	2.086E+01	1.506E+01
7	7.000	2.068E+01	1.451E+01
8	8.000	2.058E+01	1.658E+01
9	9.000	2.078E+01	1.982E+01
10	10.000	2.131E+01	2.284E+01
11	11.000	2.198E+01	2.228E+01
12	12.000	2.264E+01	2.339E+01

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 12.000 TO 24.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
13	13.000	2.332E+01	2.249E+01
14	14.000	2.404E+01	2.233E+01
15	15.000	2.460E+01	2.294E+01
16	16.000	2.492E+01	2.268E+01
17	17.000	2.507E+01	2.175E+01
18	18.000	2.520E+01	1.995E+01
19	19.000	2.518E+01	1.903E+01
20	20.000	2.501E+01	1.821E+01
21	21.000	2.466E+01	1.701E+01
22	22.000	2.425E+01	1.697E+01
23	23.000	2.394E+01	1.651E+01
24	24.000	2.366E+01	1.603E+01

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 24.000 TO 36.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
25	25.000	2.337E+01	1.463E+01
26	26.000	2.308E+01	1.460E+01
27	27.000	2.279E+01	1.417E+01
28	28.000	2.250E+01	1.397E+01
29	29.000	2.222E+01	1.303E+01
30	30.000	2.192E+01	1.214E+01
31	31.000	2.162E+01	1.198E+01
32	32.000	2.140E+01	1.458E+01
33	33.000	2.140E+01	1.611E+01
34	34.000	2.177E+01	1.804E+01
35	35.000	2.239E+01	1.922E+01
36	36.000	2.292E+01	1.923E+01

1 SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 36.000 TO 48.000
 IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
37	37.000	2.354E+01	1.939E+01
38	38.000	2.426E+01	2.036E+01
39	39.000	2.488E+01	2.035E+01
40	40.000	2.522E+01	2.042E+01

41	41.000	2.535E+01	1.976E+01
42	42.000	2.543E+01	1.766E+01
43	43.000	2.534E+01	1.624E+01
44	44.000	2.507E+01	1.478E+01
45	45.000	2.462E+01	1.429E+01
46	46.000	2.411E+01	1.277E+01
47	47.000	2.370E+01	1.269E+01
48	48.000	2.330E+01	1.235E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 48.000 TO 60.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
49	49.000	2.291E+01	1.068E+01
50	50.000	2.250E+01	9.640E+00
51	51.000	2.208E+01	8.380E+00
52	52.000	2.164E+01	7.440E+00
53	53.000	2.119E+01	6.170E+00
54	54.000	2.072E+01	5.980E+00
55	55.000	2.027E+01	5.930E+00
56	56.000	2.008E+01	1.029E+01
57	57.000	2.028E+01	1.469E+01
58	58.000	2.062E+01	1.598E+01
59	59.000	2.114E+01	1.586E+01
60	60.000	2.166E+01	1.653E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 60.000 TO 72.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
61	61.000	2.221E+01	1.705E+01
62	62.000	2.286E+01	1.733E+01
63	63.000	2.340E+01	1.720E+01
64	64.000	2.365E+01	1.715E+01
65	65.000	2.367E+01	1.511E+01
66	66.000	2.364E+01	1.321E+01
67	67.000	2.348E+01	1.279E+01
68	68.000	2.316E+01	1.178E+01
69	69.000	2.267E+01	1.061E+01
70	70.000	2.212E+01	9.500E+00
71	71.000	2.167E+01	8.960E+00
72	72.000	2.125E+01	1.089E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 72.000 TO 84.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
73	73.000	2.088E+01	1.152E+01
74	74.000	2.055E+01	1.096E+01
75	75.000	2.024E+01	1.076E+01
76	76.000	1.994E+01	1.062E+01
77	77.000	1.965E+01	1.042E+01
78	78.000	1.936E+01	1.008E+01
79	79.000	1.908E+01	9.820E+00
80	80.000	1.904E+01	1.194E+01
81	81.000	1.932E+01	1.387E+01
82	82.000	1.972E+01	1.535E+01
83	83.000	2.025E+01	1.627E+01
84	84.000	2.079E+01	1.737E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 84.000 TO 96.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL

NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
85	85.000	2.137E+01	1.773E+01
86	86.000	2.205E+01	1.813E+01
87	87.000	2.261E+01	1.773E+01
88	88.000	2.289E+01	1.710E+01
89	89.000	2.293E+01	1.574E+01
90	90.000	2.294E+01	1.414E+01
91	91.000	2.281E+01	1.327E+01
92	92.000	2.252E+01	1.231E+01
93	93.000	2.207E+01	1.146E+01
94	94.000	2.156E+01	1.071E+01
95	95.000	2.115E+01	9.950E+00
96	96.000	2.076E+01	9.620E+00

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 96.000 TO 108.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
97	97.000	2.038E+01	9.380E+00
98	98.000	2.001E+01	9.700E+00
99	99.000	1.966E+01	9.570E+00
100	100.000	1.933E+01	9.470E+00
101	101.000	1.902E+01	9.480E+00
102	102.000	1.872E+01	9.540E+00
103	103.000	1.844E+01	9.500E+00
104	104.000	1.842E+01	1.084E+01
105	105.000	1.873E+01	1.239E+01
106	106.000	1.912E+01	1.383E+01
107	107.000	1.951E+01	1.526E+01
108	108.000	1.992E+01	1.574E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 108.000 TO 120.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
109	109.000	2.047E+01	1.704E+01
110	110.000	2.112E+01	1.726E+01
111	111.000	2.166E+01	1.753E+01
112	112.000	2.205E+01	1.747E+01
113	113.000	2.221E+01	1.650E+01
114	114.000	2.212E+01	1.474E+01
115	115.000	2.189E+01	1.428E+01
116	116.000	2.159E+01	1.340E+01
117	117.000	2.127E+01	1.275E+01
118	118.000	2.095E+01	1.264E+01
119	119.000	2.063E+01	1.241E+01
120	120.000	2.033E+01	1.180E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 120.000 TO 132.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
121	121.000	2.002E+01	1.015E+01
122	122.000	1.969E+01	9.180E+00
123	123.000	1.933E+01	6.320E+00
124	124.000	1.892E+01	4.730E+00
125	125.000	1.848E+01	4.210E+00
126	126.000	1.804E+01	4.260E+00
127	127.000	1.760E+01	4.010E+00
128	128.000	1.737E+01	5.960E+00
129	129.000	1.751E+01	1.071E+01
130	130.000	1.786E+01	1.422E+01
131	131.000	1.829E+01	1.789E+01
132	132.000	1.882E+01	2.181E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 132.000 TO 144.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
133	133.000	1.955E+01	2.280E+01
134	134.000	2.040E+01	2.361E+01
135	135.000	2.117E+01	2.424E+01
136	136.000	2.179E+01	2.395E+01
137	137.000	2.216E+01	2.237E+01
138	138.000	2.223E+01	1.689E+01
139	139.000	2.210E+01	1.548E+01
140	140.000	2.185E+01	1.397E+01
141	141.000	2.154E+01	1.329E+01
142	142.000	2.121E+01	1.257E+01
143	143.000	2.088E+01	1.219E+01
144	144.000	2.056E+01	1.207E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 144.000 TO 156.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
145	145.000	2.024E+01	1.115E+01
146	146.000	1.992E+01	1.045E+01
147	147.000	1.962E+01	1.208E+01
148	148.000	1.935E+01	1.230E+01
149	149.000	1.911E+01	1.358E+01
150	150.000	1.891E+01	1.316E+01
151	151.000	1.870E+01	8.800E+00
152	152.000	1.860E+01	1.049E+01
153	153.000	1.881E+01	1.500E+01
154	154.000	1.924E+01	2.117E+01
155	155.000	1.978E+01	2.319E+01
156	156.000	2.038E+01	2.507E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 156.000 TO 168.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
157	157.000	2.117E+01	2.686E+01
158	158.000	2.204E+01	2.683E+01
159	159.000	2.281E+01	2.649E+01
160	160.000	2.345E+01	2.700E+01
161	161.000	2.382E+01	2.420E+01
162	162.000	2.390E+01	1.815E+01
163	163.000	2.375E+01	1.652E+01
164	164.000	2.347E+01	1.514E+01
165	165.000	2.314E+01	1.360E+01
166	166.000	2.277E+01	1.339E+01
167	167.000	2.239E+01	1.138E+01
168	168.000	2.199E+01	9.970E+00

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 168.000 TO 180.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
169	169.000	2.157E+01	8.980E+00
170	170.000	2.116E+01	9.660E+00
171	171.000	2.076E+01	9.430E+00
172	172.000	2.036E+01	8.550E+00
173	173.000	1.998E+01	8.370E+00
174	174.000	1.961E+01	7.720E+00

175	175.000	1.924E+01	7.780E+00
176	176.000	1.912E+01	1.025E+01
177	177.000	1.939E+01	1.439E+01
178	178.000	1.980E+01	1.855E+01
179	179.000	2.041E+01	2.151E+01
180	180.000	2.109E+01	2.329E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 180.000 TO 192.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
181	181.000	2.185E+01	2.574E+01
182	182.000	2.274E+01	2.583E+01
183	183.000	2.351E+01	2.558E+01
184	184.000	2.401E+01	2.523E+01
185	185.000	2.426E+01	2.363E+01
186	186.000	2.444E+01	1.872E+01
187	187.000	2.442E+01	1.574E+01
188	188.000	2.420E+01	1.523E+01
189	189.000	2.377E+01	1.327E+01
190	190.000	2.327E+01	1.259E+01
191	191.000	2.285E+01	1.156E+01
192	192.000	2.243E+01	1.072E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 192.000 TO 204.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
193	193.000	2.202E+01	9.420E+00
194	194.000	2.159E+01	8.770E+00
195	195.000	2.117E+01	8.710E+00
196	196.000	2.076E+01	9.280E+00
197	197.000	2.037E+01	8.920E+00
198	198.000	2.001E+01	9.060E+00
199	199.000	1.966E+01	8.590E+00
200	200.000	1.954E+01	1.058E+01
201	201.000	1.980E+01	1.585E+01
202	202.000	2.023E+01	1.888E+01
203	203.000	2.085E+01	2.318E+01
204	204.000	2.154E+01	2.561E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 204.000 TO 216.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
205	205.000	2.227E+01	2.507E+01
206	206.000	2.314E+01	2.548E+01
207	207.000	2.391E+01	2.547E+01
208	208.000	2.439E+01	2.589E+01
209	209.000	2.464E+01	2.411E+01
210	210.000	2.483E+01	1.972E+01
211	211.000	2.484E+01	1.782E+01
212	212.000	2.465E+01	1.639E+01
213	213.000	2.424E+01	1.450E+01
214	214.000	2.377E+01	1.438E+01
215	215.000	2.340E+01	1.388E+01
216	216.000	2.303E+01	1.296E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 216.000 TO 228.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
--------------------	------	-------	------

217	217.000	2.267E+01	1.149E+01
218	218.000	2.228E+01	1.012E+01
219	219.000	2.189E+01	1.002E+01
220	220.000	2.149E+01	9.260E+00
221	221.000	2.109E+01	9.180E+00
222	222.000	2.071E+01	9.200E+00
223	223.000	2.034E+01	9.530E+00
224	224.000	2.022E+01	1.206E+01
225	225.000	2.049E+01	1.700E+01
226	226.000	2.093E+01	2.216E+01
227	227.000	2.158E+01	2.343E+01
228	228.000	2.226E+01	2.492E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 228.000 TO 240.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
229	229.000	2.297E+01	2.584E+01
230	230.000	2.383E+01	2.639E+01
231	231.000	2.460E+01	2.652E+01
232	232.000	2.507E+01	2.603E+01
233	233.000	2.530E+01	2.422E+01
234	234.000	2.548E+01	1.976E+01
235	235.000	2.546E+01	1.717E+01
236	236.000	2.525E+01	1.687E+01
237	237.000	2.483E+01	1.471E+01
238	238.000	2.434E+01	1.387E+01
239	239.000	2.393E+01	1.294E+01
240	240.000	2.353E+01	1.161E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 240.000 TO 252.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
241	241.000	2.311E+01	1.128E+01
242	242.000	2.269E+01	9.300E+00
243	243.000	2.226E+01	8.790E+00
244	244.000	2.183E+01	9.580E+00
245	245.000	2.142E+01	9.670E+00
246	246.000	2.103E+01	8.550E+00
247	247.000	2.063E+01	7.680E+00
248	248.000	2.046E+01	1.019E+01
249	249.000	2.066E+01	1.543E+01
250	250.000	2.105E+01	1.956E+01
251	251.000	2.164E+01	2.190E+01
252	252.000	2.227E+01	2.380E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 252.000 TO 264.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
253	253.000	2.301E+01	2.731E+01
254	254.000	2.390E+01	2.609E+01
255	255.000	2.466E+01	2.586E+01
256	256.000	2.514E+01	2.538E+01
257	257.000	2.537E+01	2.387E+01
258	258.000	2.554E+01	2.009E+01
259	259.000	2.554E+01	1.822E+01
260	260.000	2.533E+01	1.664E+01
261	261.000	2.494E+01	1.699E+01
262	262.000	2.450E+01	1.586E+01
263	263.000	2.414E+01	1.447E+01
264	264.000	2.379E+01	1.406E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 264.000 TO 276.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
265	265.000	2.345E+01	1.414E+01
266	266.000	2.312E+01	1.402E+01
267	267.000	2.279E+01	1.267E+01
268	268.000	2.247E+01	1.266E+01
269	269.000	2.214E+01	1.169E+01
270	270.000	2.181E+01	1.123E+01
271	271.000	2.148E+01	1.162E+01
272	272.000	2.133E+01	1.379E+01
273	273.000	2.153E+01	1.777E+01
274	274.000	2.196E+01	2.125E+01
275	275.000	2.237E+01	2.195E+01
276	276.000	2.257E+01	1.652E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 276.000 TO 288.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
277	277.000	2.262E+01	1.486E+01
278	278.000	2.256E+01	1.424E+01
279	279.000	2.240E+01	1.446E+01
280	280.000	2.221E+01	1.427E+01
281	281.000	2.201E+01	1.451E+01
282	282.000	2.177E+01	1.381E+01
283	283.000	2.152E+01	1.376E+01
284	284.000	2.126E+01	1.339E+01
285	285.000	2.101E+01	1.333E+01
286	286.000	2.076E+01	1.358E+01
287	287.000	2.052E+01	1.261E+01
288	288.000	2.027E+01	1.232E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 288.000 TO 300.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
289	289.000	2.003E+01	1.211E+01
290	290.000	1.978E+01	1.169E+01
291	291.000	1.953E+01	1.156E+01
292	292.000	1.929E+01	1.159E+01
293	293.000	1.905E+01	1.078E+01
294	294.000	1.881E+01	1.075E+01
295	295.000	1.857E+01	1.086E+01
296	296.000	1.845E+01	1.303E+01
297	297.000	1.857E+01	1.592E+01
298	298.000	1.896E+01	1.659E+01
299	299.000	1.947E+01	1.808E+01
300	300.000	1.993E+01	1.880E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 300.000 TO 312.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
301	301.000	2.050E+01	1.922E+01
302	302.000	2.118E+01	1.949E+01
303	303.000	2.178E+01	1.943E+01
304	304.000	2.221E+01	1.941E+01
305	305.000	2.242E+01	1.842E+01
306	306.000	2.239E+01	1.623E+01
307	307.000	2.220E+01	1.537E+01
308	308.000	2.193E+01	1.409E+01

309	309.000	2.162E+01	1.322E+01
310	310.000	2.131E+01	1.268E+01
311	311.000	2.098E+01	1.148E+01
312	312.000	2.064E+01	1.093E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 312.000 TO 324.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
313	313.000	2.031E+01	1.065E+01
314	314.000	1.997E+01	1.026E+01
315	315.000	1.965E+01	9.950E+00
316	316.000	1.933E+01	9.550E+00
317	317.000	1.901E+01	9.120E+00
318	318.000	1.869E+01	8.360E+00
319	319.000	1.837E+01	8.200E+00
320	320.000	1.829E+01	9.650E+00
321	321.000	1.845E+01	1.376E+01
322	322.000	1.878E+01	1.681E+01
323	323.000	1.926E+01	1.812E+01
324	324.000	1.974E+01	2.027E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 324.000 TO 336.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
325	325.000	2.034E+01	1.960E+01
326	326.000	2.087E+01	1.943E+01
327	327.000	2.116E+01	1.950E+01
328	328.000	2.133E+01	1.993E+01
329	329.000	2.137E+01	1.864E+01
330	330.000	2.131E+01	1.776E+01
331	331.000	2.118E+01	1.726E+01
332	332.000	2.101E+01	1.652E+01
333	333.000	2.083E+01	1.591E+01
334	334.000	2.065E+01	1.635E+01
335	335.000	2.047E+01	1.543E+01
336	336.000	2.030E+01	1.592E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 336.000 TO 348.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
337	337.000	2.014E+01	1.685E+01
338	338.000	1.998E+01	1.347E+01
339	339.000	1.978E+01	1.242E+01
340	340.000	1.956E+01	1.228E+01
341	341.000	1.933E+01	1.202E+01
342	342.000	1.908E+01	1.058E+01
343	343.000	1.881E+01	1.004E+01
344	344.000	1.860E+01	1.093E+01
345	345.000	1.876E+01	1.365E+01
346	346.000	1.902E+01	1.472E+01
347	347.000	1.929E+01	1.376E+01
348	348.000	1.966E+01	1.530E+01

1

SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 348.000 TO 360.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
349	349.000	1.999E+01	1.571E+01
350	350.000	2.042E+01	1.622E+01

351	351.000	2.078E+01	1.312E+01
352	352.000	2.079E+01	1.423E+01
353	353.000	2.064E+01	1.405E+01
354	354.000	2.061E+01	1.254E+01
355	355.000	2.051E+01	1.184E+01
356	356.000	2.027E+01	1.072E+01
357	357.000	1.986E+01	9.550E+00
358	358.000	1.941E+01	9.960E+00
359	359.000	1.906E+01	9.390E+00
360	360.000	1.873E+01	9.340E+00

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 360.000 TO 372.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
361	361.000	1.841E+01	9.320E+00
362	362.000	1.812E+01	9.200E+00
363	363.000	1.783E+01	9.060E+00
364	364.000	1.755E+01	8.410E+00
365	365.000	1.726E+01	7.320E+00
366	366.000	1.696E+01	6.580E+00
367	367.000	1.665E+01	6.370E+00
368	368.000	1.651E+01	9.090E+00
369	369.000	1.670E+01	1.218E+01
370	370.000	1.709E+01	1.386E+01
371	371.000	1.765E+01	1.574E+01
372	372.000	1.922E+01	1.656E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 372.000 TO 384.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
373	373.000	1.882E+01	1.687E+01
374	374.000	1.954E+01	1.636E+01
375	375.000	2.015E+01	1.663E+01
376	376.000	2.049E+01	1.663E+01
377	377.000	2.061E+01	1.631E+01
378	378.000	2.069E+01	1.308E+01
379	379.000	2.061E+01	1.100E+01
380	380.000	2.035E+01	1.064E+01
381	381.000	1.991E+01	9.790E+00
382	382.000	1.942E+01	9.050E+00
383	383.000	1.902E+01	8.220E+00
384	384.000	1.864E+01	8.330E+00

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 384.000 TO 396.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
385	385.000	1.827E+01	7.800E+00
386	386.000	1.791E+01	6.890E+00
387	387.000	1.755E+01	6.510E+00
388	388.000	1.720E+01	6.570E+00
389	389.000	1.685E+01	5.950E+00
390	390.000	1.650E+01	5.300E+00
391	391.000	1.616E+01	5.850E+00
392	392.000	1.600E+01	8.520E+00
393	393.000	1.620E+01	1.140E+01
394	394.000	1.660E+01	1.370E+01
395	395.000	1.717E+01	1.536E+01
396	396.000	1.775E+01	1.703E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 396.000 TO 408.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
397	397.000	1.840E+01	1.916E+01
398	398.000	1.917E+01	1.832E+01
399	399.000	1.985E+01	1.863E+01
400	400.000	2.026E+01	1.812E+01
401	401.000	2.041E+01	1.667E+01
402	402.000	2.053E+01	1.558E+01
403	403.000	2.052E+01	1.495E+01
404	404.000	2.034E+01	1.305E+01
405	405.000	1.999E+01	1.282E+01
406	406.000	1.960E+01	1.242E+01
407	407.000	1.929E+01	1.117E+01
408	408.000	1.900E+01	1.131E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 408.000 TO 420.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
409	409.000	1.873E+01	1.212E+01
410	410.000	1.847E+01	1.173E+01
411	411.000	1.824E+01	1.168E+01
412	412.000	1.801E+01	1.088E+01
413	413.000	1.778E+01	1.038E+01
414	414.000	1.755E+01	1.076E+01
415	415.000	1.733E+01	1.050E+01
416	416.000	1.714E+01	1.067E+01
417	417.000	1.722E+01	1.366E+01
418	418.000	1.759E+01	1.646E+01
419	419.000	1.808E+01	1.609E+01
420	420.000	1.857E+01	1.612E+01

1
SIMULATION SUMMARY FOR TIME = 420.000 TO 432.000
IN INTERVALS OF 1.000 HOUR

INTERVAL NUMBER	TIME	TCUB3	TAMB
421	421.000	1.913E+01	1.668E+01
422	422.000	1.979E+01	1.678E+01
423	423.000	2.037E+01	1.736E+01
424	424.000	2.070E+01	1.673E+01
425	425.000	2.080E+01	1.584E+01
426	426.000	2.089E+01	1.358E+01
427	427.000	2.082E+01	1.260E+01
428	428.000	2.058E+01	1.113E+01
429	429.000	2.015E+01	9.330E+00
430	430.000	1.966E+01	1.015E+01
431	431.000	1.927E+01	7.810E+00
432	432.000	1.887E+01	6.760E+00
SUM	432.000	9.095E+03	6.286E+03

UNIT	1	WAS CALLED	434	TIMES
	2		421	
	3		382	
	4		434	
	5		434	
	6		434	
	56		434	
	28		434	

ANEXO C

**CORRIDA REALIZADA CON DOE 2.1-E
EN EL LABORATORIO DE HERMOSILLO, SON.**

(Módulo de LOADS)

```

****   ***   *****   ***   *   *****
* * * * *   * * * * *   * * * * *   * * * * *
* * * * *   * * * * *   * * * * *   * * * * *
* * * * *   * * * * *   * * * * *   * * * * *
****   ***   *****   *****   *   ***   *****

```

BUILDING ENERGY ANALYSIS PROGRAM

DEVELOPED BY

LAWRENCE BERKELEY LABORATORY/UNIVERSITY OF CALIFORNIA,
WITH THE ASSISTANCE OF HIRSCH & ASSOCIATES, CAMARILLO, CA

WITH MAJOR SUPPORT FROM

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY
ASSISTANT SECRETARY FOR ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY
OFFICE OF BUILDING TECHNOLOGIES
BUILDING SYSTEMS AND MATERIALS DIVISION

AND ADDITIONAL SUPPORT FROM

SOUTHERN CALIFORNIA EDISON CO., PACIFIC GAS AND ELECTRIC CO.,
GAS RESEARCH INSTITUTE, ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

COPYRIGHT 1993 REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA,
LAWRENCE BERKELEY LABORATORY

```

***** L E G A L   N O T I C E *****
*
*
*   THIS PROGRAM WAS PREPARED AS AN ACCOUNT OF WORK SPONSORED BY THE
*   UNITED STATES GOVERNMENT. NEITHER THE UNITED STATES NOR THE DEPART-
*   MENT OF ENERGY, NOR ANY OF THEIR EMPLOYEES, NOR ANY OF THEIR CON-
*   TRACTORS, SUBCONTRACTORS, OR THEIR EMPLOYEES, MAKES ANY WARRANTY,
*   EXPRESS OR IMPLIED, OR ASSUMES ANY LEGAL LIABILITY OR RESPONSIBILITY
*   FOR THE ACCURACY, COMPLETENESS OR USEFULNESS OF ANY INFORMATION, APPA-
*   RATUS, PRODUCT OR PROCESS DISCLOSED, OR REPRESENTS THAT ITS USE WOULD
*   NOT INFRINGE PRIVATELY OWNED RIGHTS.
*
*
*****

```

LBL RELEASE OCT 1993

version : 2.1E-058

1

```

*   1 * $DESCRIPCION DE UN CUBICULO DE INVESTIGACION PARA SU SIMULACION EN DOE-2
*   2 * $LAS PUERTAS EXISTENTES ENTRE LOS CUBICULOS SE HAN DESCRITO COMO MUROS
*   3 * $DE AIRE, PUES ESTABAN ABIERTAS DURANTE EL MONITOREO
*   4 *
*   5 * INPUT LOADS INPUT-UNITS-METRIC OUTPUT-UNITS-METRIC ..

```

1

LDL PROCESSOR INPUT DATA

9/14/1998 20:13:13 LDL RUN 1

```

*   6 *
*   7 * TITLE
*   8 * LINE-1 * ENTRADAS PARA UN CUBICULO DE INVESTIGACION *
*   9 * LINE-2 * DATOS PARA LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA *

```

```

* 10 * LINE-3 * MONITOREO REALIZADO IN SITU DEL 8 AL 25 DE DIC DE 1997 *
* 11 * LINE-4 * NO SE CONSIDERAN CAMBIOS DE AIRE AL EXTERIOR POR INF O VENT*
* 12 * ..
* 13 *
* 14 * RUN-PERIOD          DEC 8 1997 THRU DEC 25 1997 ..
* 15 *
* 16 * DIAGNOSTIC CAUTIONS,WIDE,ECHO,SINGLE-SPACED ..
* 17 * ABORT  ERRORS ..
* 18 *
* 19 * BUILDING-LOCATION
* 20 * LAT=29.04 LON=110.58 ALT=237 T-Z=6
* 21 * DAYLIGHT-SAVINGS NO
* 22 * HOLIDAY NO
* 23 * GROUND-T = (14.56,14.56,14.56,14.56,14.56,14.56,14.56,14.56,
* 24 *          14.56,14.56,14.56)..
* 25 *
* 26 *
* 27 *
* 28 * LOADS-REPORT VERIFICATION = (LV-A,LV-D)
* 29 * SUMMARY = (LS-D)
* 30 * HOURLY-DATA=SAVE=FORMATTED
* 31 * REPORT-FREQUENCY=HOURLY
* 32 * ..
* 33 *
* 34 * $ CONSTRUCTION AND GLASS TYPES
* 35 *
* 36 * $ ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL EDIFICIO = BUILDING CONSTRUCTION
* 37 *
* 38 * YESO = MATERIAL
* 39 * CONDUCTIVITY = 0.460 DENSITY = 1280
* 40 * SPECIFIC-HEAT = 900 THICKNESS = 0.02 ..
* 41 * MORTERO = MATERIAL
* 42 * CONDUCTIVITY = 0.63 DENSITY = 2000
* 43 * SPECIFIC-HEAT = 1100 THICKNESS = .03 ..
* 44 * LADRILLO = MATERIAL
* 45 * CONDUCTIVITY = 0.65 DENSITY = 1919
* 46 * SPECIFIC-HEAT = 745 THICKNESS = .14 ..
* 47 * MOZAICO = MATERIAL
* 48 * CONDUCTIVITY = 0.49 DENSITY = 480
* 49 * SPECIFIC-HEAT = 850 THICKNESS = .016 ..
* 50 * CONCRETM = MATERIAL
* 51 * CONDUCTIVITY = 1.8 DENSITY = 2300
* 52 * SPECIFIC-HEAT = 1250 THICKNESS = .20 ..
* 53 * CONCRETL = MATERIAL
* 54 * CONDUCTIVITY = 1.8 DENSITY = 2300
* 55 * SPECIFIC-HEAT = 1250 THICKNESS = .12 ..
* 56 * AIRE = MATERIAL
* 57 * RESISTANCE = 0.02 ..
* 58 *
* 59 * $ COMPOSICION DE LOS MUROS
* 60 *
* 61 * ENTREPIS = LAYERS MATERIAL = (CONCRETL,MORTERO,MOZAICO)
* 62 * INSIDE-FILM-RES = 0.106 ..
* 63 * TECHO = LAYERS MATERIAL = (CONCRETL)
* 64 * INSIDE-FILM-RES = 0.151 ..
* 65 * MUROEXT1 = LAYERS MATERIAL = (YESO,LADRILLO,YESO)
* 66 * INSIDE-FILM-RES = 0.123 ..
* 67 * MUROEXT2 = LAYERS MATERIAL = (CONCRETM)
* 68 * INSIDE-FILM-RES = 0.123 ..
* 69 * MUROINT1 = LAYERS MATERIAL = (CONCRETM)
* 70 * INSIDE-FILM-RES = 0.123 ..
* 71 * MUROINT2 = LAYERS MATERIAL = (YESO,LADRILLO,YESO)
* 72 * INSIDE-FILM-RES = 0.123 ..
* 73 * $MUROAIRE = LAYERS U-VALUE = 14.8 ..
* 74 *
* 75 * MURODEAIRE = CONSTRUCTION U-VALUE = 14.8 ..
* 76 *
* 77 * WENTREPIS = CONSTRUCTION LAYERS = ENTREPIS ..
* 78 *
* 79 * WTECHO = CONSTRUCTION LAYERS = TECHO ..
* 80 *
* 81 * WMUROEXT1 = CONSTRUCTION LAYERS = MUROEXT1
* 82 * ABSORPTANCE = 0.4
* 83 * ROUGHNESS = 2 ..

```

```

* 84 *
* 85 * WMUROEXT2 = CONSTRUCTION LAYERS = MUROEXT2
* 86 *   ABSORPTANCE = 0.4
* 87 *   ROUGHNESS   = 2 ..
* 88 *
* 89 * WMUPOINT1 = CONSTRUCTION U-VALUE = 2.0 .. $LAYERS = MUPOINT1 ..
* 90 *
* 91 * WMUPOINT2 = CONSTRUCTION U-VALUE = 2.0 .. $LAYERS = MUPOINT2 ..
* 92 *
* 93 * SINGLE-1 = GLASS-TYPE
* 94 *   PANES = 1
* 95 *   SHADING-COEF = 1.0
* 96 *   GLASS-CONDUCTANCE = 8.34 ..
* 97 *
* 98 * $ ITINERARIOS = SCHEDULES
* 99 *
* 100 * $ LAS GANANCIAS INTERNAS SE DAN POR LOS HORARIOS DE LOS OCUPANTES
* 101 * $ Y POR EL USO DE ILUMINACION Y COMPUTADORAS. LOS FINES DE SEMANA
* 102 * $ SE ANULAN LAS GANANCIAS INTERNAS.
* 103 *
* 104 * PEOPSC-1 = SCHEDULE THRU DEC 31
* 105 *   (MON,FRI) (1,9) VALUES=(0.0)
* 106 *   (10,14) VALUES=(1.0)
* 107 *   (15,18) VALUES=(0.0)
* 108 *   (19,21) VALUES=(1.0)
* 109 *   (22,24) VALUES=(0.0)
* 110 *   (WEH) (1,24) VALUES=(0.0) ..
* 111 *
* 112 * PEOPSC-2 = SCHEDULE THRU DEC 31
* 113 *   (MON,FRI) (1,10) VALUES=(0.0)
* 114 *   (11,15) VALUES=(1.0)
* 115 *   (16,17) VALUES=(0.0)
* 116 *   (18,20) VALUES=(1.0)
* 117 *   (21,24) VALUES=(0.0)
* 118 *   (WEH) (1,24) VALUES=(0.0) ..
* 119 *
* 120 * ILUMISC-1 = SCHEDULE THRU DEC 31
* 121 *   (MON,FRI) (1,9) VALUES=(0.0)
* 122 *   (10,14) VALUES=(1.0)
* 123 *   (15,18) VALUES=(0.0)
* 124 *   (19,21) VALUES=(1.0)
* 125 *   (22,24) VALUES=(0.0)
* 126 *   (WEH) (1,24) VALUES=(0.0) ..
* 127 *
* 128 * ILUMISC-2 = SCHEDULE THRU DEC 31
* 129 *   (MON,FRI) (1,18) VALUES=(0.0)
* 130 *   (19,21) VALUES=(1.0)
* 131 *   (22,24) VALUES=(0.0)
* 132 *   (WEH) (1,24) VALUES=(0.0) ..
* 133 *
* 134 * COMPSC-1 = SCHEDULE THRU DEC 31
* 135 *   (MON,FRI) (1,9) VALUES=(0.0)
* 136 *   (10,14) VALUES=(1.0)
* 137 *   (15,18) VALUES=(0.0)
* 138 *   (19,21) VALUES=(1.0)
* 139 *   (22,24) VALUES=(0.0)
* 140 *   (WEH) (1,24) VALUES=(0.0) ..
* 141 *
* 142 *
* 143 * COMPSC-2 = SCHEDULE THRU DEC 31
* 144 *   (MON,FRI) (1,10) VALUES=(0.0)
* 145 *   (11,15) VALUES=(1.0)
* 146 *   (16,17) VALUES=(0.0)
* 147 *   (18,20) VALUES=(1.0)
* 148 *   (21,24) VALUES=(0.0)
* 149 *   (WEH) (1,24) VALUES=(0.0) ..
* 150 *
* 151 *
* 152 * $ LA INFILTRACION SE SUPONE INEXISTENTE
* 153 *
* 154 * $ ALEROS Y PARASOLES = BUILDING-SHADE
* 155 *
* 156 * PARSOL-1 = BUILDING-SHADE
* 157 *   HEIGHT = 3.75

```

```

* 158 *      WIDTH      = 2.4
* 159 *      TRANSMITTANCE = 0
* 160 *      X          = 0
* 161 *      Y          = 26.68
* 162 *      Z          = 0
* 163 *      AZIMUTH     = 0
* 164 *      TILT        = 90 ..
* 165 *
* 166 * PARSOL-2 - BUILDING-SHADE
* 167 *      HEIGHT      = 3.75
* 168 *      WIDTH      = 2.4
* 169 *      TRANSMITTANCE = 0
* 170 *      X          = 0
* 171 *      Y          = 0
* 172 *      Z          = 0
* 173 *      AZIMUTH     = 0
* 174 *      TILT        = 90 ..
* 175 *
* 176 * ALERO-1 - BUILDING-SHADE
* 177 *      HEIGHT      = 26.68
* 178 *      WIDTH      = 2.4
* 179 *      TRANSMITTANCE = 0
* 180 *      X          = -2.4
* 181 *      Y          = 0
* 182 *      Z          = 3.75
* 183 *      AZIMUTH     = 180
* 184 *      TILT        = 0 ..
* 185 *
* 186 * FALDON-1 - BUILDING-SHADE
* 187 *      HEIGHT      = 1.3
* 188 *      WIDTH      = 26.68
* 189 *      TRANSMITTANCE = 0
* 190 *      X          = -2.4
* 191 *      Y          = 26.68
* 192 *      Z          = 2.45
* 193 *      AZIMUTH     = 270
* 194 *      TILT        = 90 ..
* 195 *
* 196 * $ CONDICIONES DE LOS ESPACIOS = SPACE-CONDITIONS
* 197 * $ LOS UNICOS ELEMENTOS QUE PROVOCAN SOMBRAS SON LOS DESCRITOS
* 198 * $ ANTERIORMENTE, LOS MUROS O LOSAS NO SE PROVOCAN SOMBRAS A SI MISMOS
* 199 *
* 200 * $ EL EDIFICIO SIMULADO CONSTA DE 4 ESPACIOS
* 201 *
* 202 * COND-1 = SPACE-CONDITIONS
* 203 *      LIGHTING-TYPE=SUS-FLUOR
* 204 *      LIGHTING-KW=0.56
* 205 *      LIGHT-TO-SPACE=1
* 206 *      LIGHTING-SCHEDULE=ILUMISC-2 ..
* 207 *
* 208 * COND-2 = SPACE-CONDITIONS
* 209 *      NUMBER-OF-PEOPLE=1
* 210 *      PEOPLE-HG-LAT=75
* 211 *      PEOPLE-HG-SENS=75
* 212 *      PEOPLE-SCHEDULE=PEOPSC-1
* 213 *      LIGHTING-TYPE=SUS-FLUOR
* 214 *      LIGHTING-KW=0.14
* 215 *      LIGHT-TO-SPACE=1
* 216 *      LIGHTING-SCHEDULE=ILUMISC-2
* 217 *      EQUIPMENT-KW=0.500
* 218 *      EQUIP-SCHEDULE=COMPSC-1 ..
* 219 *
* 220 * COND-3 = SPACE-CONDITIONS
* 221 *      NUMBER-OF-PEOPLE=1
* 222 *      PEOPLE-HG-LAT=75
* 223 *      PEOPLE-HG-SENS=75
* 224 *      PEOPLE-SCHEDULE=PEOPSC-1
* 225 *      LIGHTING-TYPE=SUS-FLUOR
* 226 *      LIGHTING-KW=0.14
* 227 *      LIGHT-TO-SPACE=1
* 228 *      LIGHTING-SCHEDULE=ILUMISC-1
* 229 *      EQUIPMENT-KW=0.500
* 230 *      EQUIP-SCHEDULE=COMPSC-1 ..
* 231 *

```

```

* 232 * COND-4 = SPACE-CONDITIONS
* 233 *   NUMBER-OF-PEOPLE=1
* 234 *   PEOPLE-HG-LAT=75
* 235 *   PEOPLE-HG-SENS=75
* 236 *   PEOPLE-SCHEDULE=PEOPSC-2
* 237 *   LIGHTING-TYPE=SUS-FLUOR
* 238 *   LIGHTING-KW=0.28
* 239 *   LIGHT-TO-SPACE=1
* 240 *   LIGHTING-SCHEDULE=ILUMISC-2
* 241 *   EQUIPMENT-KW=0.500
* 242 *   EQUIP-SCHEDULE=COMPSC-2
* 243 *
* 244 * $ LOS ESPACIOS SE CONSIDERAN SELLADOS, SIN INFILTRACION NI VENTILACION
* 245 *
* 246 * $ DESCRIPCION DEL EDIFICIO = SPACE DESCRIPTIONS
* 247 * $ WALLS, WINDOWS AND DOORS
* 248 *
* 249 * LAB-1 =SPACE                SPACE-CONDITIONS=COND-1
* 250 *                               AREA=77.76 VOLUME=245.00 ..
* 251 *
* 252 * OESTE-1 =EXTERIOR-WALL    HEIGHT      = 3.15
* 253 *                               WIDTH       = 9.72
* 254 *                               X           = 0
* 255 *                               Y           = 12.96
* 256 *                               Z           = 0
* 257 *                               AZIMUTH     = 270
* 258 *                               TILT        = 90
* 259 *                               CONSTRUCTION = WMUROEXT1 ..
* 260 *
* 261 * VENT-1 =WINDOW            HEIGHT      = 0.75
* 262 *                               WIDTH       = 8.82
* 263 *                               X           = 0.15
* 264 *                               Y           = 1.75
* 265 *                               GLASS-TYPE   = SINGLE-1 ..
* 266 *
* 267 * TECO-1 =EXTERIOR-WALL    HEIGHT      = 9.72
* 268 *                               WIDTH       = 8.00
* 269 *                               X           = 0
* 270 *                               Y           = 3.24
* 271 *                               Z           = 3.15
* 272 *                               AZIMUTH     = 180
* 273 *                               TILT        = 0
* 274 *                               CONSTRUCTION = WTECHO ..
* 275 *
* 276 * INTSUR-1 =INTERIOR-WALL   HEIGHT      = 3.15
* 277 *                               WIDTH       = 3.20
* 278 *                               TILT        = 90
* 279 *                               CONSTRUCTION = WMUROUT2
* 280 *                               NEXT-TO CUB-1 ..
* 281 *
* 282 *
* 283 * PUERTA-1 =INTERIOR-WALL   HEIGHT      = 3.15
* 284 *                               WIDTH       = 0.80
* 285 *                               TILT        = 90
* 286 *                               CONSTRUCTION = MURODEAIRE
* 287 *                               NEXT-TO CUB-1 ..
* 288 *
-----CAUTION-----
* 288 * INTERIOR WALL WILL BE TREATED AS INT-WALL-TYPE-AIR
* 289 * INTSUR-10 =INTERIOR-WALL   LIKE INTSUR-1
* 290 *                               NEXT-TO CUB-2 ..
* 291 *
* 292 * PUERTA-2 =INTERIOR-WALL   LIKE PUERTA-1
* 293 *                               NEXT-TO CUB-2 ..
* 294 *
* 295 * INTEST-1 =INTERIOR-WALL   HEIGHT      = 3.15
* 296 *                               WIDTH       = 2.44
* 297 *                               TILT        = 90
* 298 *                               CONSTRUCTION = WMUROUT2
* 299 *                               NEXT-TO CUB-3 ..
* 300 *
* 301 * PUERTA-3 =INTERIOR-WALL   LIKE PUERTA-1
* 302 *                               NEXT-TO CUB-3 ..
* 303 *

```

```

* 304 * $ LOS SIGUIENTES 2 MUROS Y EL PISO SON ADIABATICOS "COMO SE DESCRIBEN?
* 305 *
* 306 * INTEST-10 =INTERIOR-WALL      INT-WALL-TYPE =      ADIABATIC
* 307 *                                HEIGHT      = 3.15
* 308 *                                WIDTH       = 6.48
* 309 * $                                TILT      = 90
* 310 *                                CONSTRUCTION = WMUROINT2 ..
* 311 *
* 312 * INTNOR-1 =INTERIOR-WALL      INT-WALL-TYPE =      ADIABATIC
* 313 *                                HEIGHT      = 3.15
* 314 *                                WIDTH       = 8.00
* 315 * $                                TILT      = 90
* 316 *                                CONSTRUCTION = WMUROINT1 ..
* 317 *
* 318 * PISO-1 =INTERIOR-WALL      INT-WALL-TYPE =      ADIABATIC
* 319 *                                HEIGHT      = 9.72
* 320 *                                WIDTH       = 8.00
* 321 * $                                TILT      = 0
* 322 *                                CONSTRUCTION = WENTREPIS ..
* 323 *
* 324 * CUB-1 =SPACE                SPACE-CONDITIONS=COND-2
* 325 *                                AREA=12.96 VOLUME=40.82 ..
* 326 *
* 327 * OESTE-2 =EXTERIOR-WALL      HEIGHT      = 3.15
* 328 *                                WIDTH       = 3.24
* 329 *                                X           = 0
* 330 *                                Y           = 3.24
* 331 *                                Z           = 0
* 332 *                                AZIMUTH     = 270
* 333 *                                TILT        = 90
* 334 *                                CONSTRUCTION = WMUROEXT1 ..
* 335 *
* 336 * SUR-2 =EXTERIOR-WALL      HEIGHT      = 3.15
* 337 *                                WIDTH       = 4.00
* 338 *                                X           = 0
* 339 *                                Y           = 0
* 340 *                                Z           = 0
* 341 *                                AZIMUTH     = 180
* 342 *                                TILT        = 90
* 343 *                                CONSTRUCTION = WMUROEXT2 ..
* 344 *
* 345 * TECO-2 =EXTERIOR-WALL      HEIGHT      = 3.24
* 346 *                                WIDTH       = 4.00
* 347 *                                X           = 0
* 348 *                                Y           = 0
* 349 *                                Z           = 3.15
* 350 *                                AZIMUTH     = 180
* 351 *                                TILT        = 0
* 352 *                                CONSTRUCTION = WTECHO ..
* 353 *
* 354 * INTEST-2 =INTERIOR-WALL      HEIGHT      = 3.15
* 355 *                                WIDTH       = 3.24
* 356 *                                TILT        = 90
* 357 *                                CONSTRUCTION = WMUROINT2
* 358 *                                NEXT-TO CUB-2 ..
* 359 *
* 360 * $ EL PISO SE CONSIDERA ADIABATICO
* 361 *
* 362 * PISO-2 =INTERIOR-WALL      INT-WALL-TYPE =      ADIABATIC
* 363 *                                HEIGHT      = 3.24
* 364 *                                WIDTH       = 4.00
* 365 * $                                TILT      = 0
* 366 *                                CONSTRUCTION = WENTREPIS ..
* 367 *
* 368 * CUB-2 =SPACE                SPACE-CONDITIONS=COND-3
* 369 *                                AREA=12.96 VOLUME=40.82 ..
* 370 *
* 371 * SUR-3 =EXTERIOR-WALL      HEIGHT      = 3.15
* 372 *                                WIDTH       = 4.00
* 373 *                                X           = 4
* 374 *                                Y           = 0
* 375 *                                Z           = 0
* 376 *                                AZIMUTH     = 180
* 377 *                                TILT        = 90

```

```

* 378 * CONSTRUCTION = WMUROEXT2 ..
* 379 *
* 380 * TECO-3 =EXTERIOR-WALL HEIGHT = 3.24
* 381 * WIDTH = 4.00
* 382 * X = 4
* 383 * Y = 0
* 384 * Z = 3.15
* 385 * AZIMUTH = 180
* 386 * TILT = 0
* 387 * CONSTRUCTION = WTECHO ..
* 388 *
* 389 * INTEST-3 =INTERIOR-WALL HEIGHT = 3.15
* 390 * WIDTH = 3.24
* 391 * $ TILT = 90
* 392 * CONSTRUCTION = WMUROINT2
* 393 * NEXT-TO CUB-3 ..
* 394 *
* 395 * $ EL PISO SE CONSIDERA ADIABATICO
* 396 *
* 397 * PISO-3 =INTERIOR-WALL INT-WALL-TYPE = ADIABATIC
* 398 * HEIGHT = 3.24
* 399 * WIDTH = 4.00
* 400 * $ TILT = 0
* 401 * CONSTRUCTION = WENTREPIS ..
* 402 *
* 403 * CUB-3 =SPACE SPACE-CONDITIONS=COND-4
* 404 * AREA=23.33 VOLUME=73.48 ..
* 405 *
* 406 * SUR-4 =EXTERIOR-WALL HEIGHT = 3.15
* 407 * WIDTH = 3.60
* 408 * X = 8
* 409 * Y = 0
* 410 * Z = 0
* 411 * AZIMUTH = 180
* 412 * TILT = 90
* 413 * CONSTRUCTION = WMUROEXT2 ..
* 414 *
* 415 * VENT-2 =WINDOW HEIGHT = 0.75
* 416 * WIDTH = 3.60
* 417 * X = 0.0
* 418 * Y = 1.75
* 419 * GLASS-TYPE = SINGLE-1 ..
* 420 *
* 421 * TECO-4 =EXTERIOR-WALL HEIGHT = 6.48
* 422 * WIDTH = 3.6
* 423 * X = 8
* 424 * Y = 0
* 425 * Z = 3.15
* 426 * AZIMUTH = 180
* 427 * TILT = 0
* 428 * CONSTRUCTION = WTECHO ..
* 429 *
* 430 * $ LOS SIGUIENTES 2 MUROS Y EL PISO SON ADIABATICOS
* 431 *
* 432 * INTEST-4 =INTERIOR-WALL INT-WALL-TYPE = ADIABATIC
* 433 * HEIGHT = 3.15
* 434 * WIDTH = 6.48
* 435 * $ TILT = 90
* 436 * CONSTRUCTION = WMUROINT2 ..
* 437 *
* 438 * INTNOR-4 =INTERIOR-WALL INT-WALL-TYPE = ADIABATIC
* 439 * HEIGHT = 3.15
* 440 * WIDTH = 3.6
* 441 * $ TILT = 90
* 442 * CONSTRUCTION = WMUROINT2 ..
* 443 *
* 444 * PISO-4 =INTERIOR-WALL INT-WALL-TYPE = ADIABATIC
* 445 * HEIGHT = 6.48
* 446 * WIDTH = 3.6
* 447 * $ TILT = 0
* 448 * CONSTRUCTION = WENTREPIS ..
* 449 *
* 450 * $ ----- Hourly Reports -----
* 451 * OUT-AMBIENT =REPORT-BLOCK VARIABLE-TYPE=GLOBAL

```

```

* 452 *          VARIABLE-LIST=(3,4,15,14) ..
* 453 *          OUT-CUB3  =REPORT-BLOCK      VARIABLE-TYPE=CUB-3
* 454 *          VARIABLE-LIST=(3,4,15,14) ..
* 455 *
* 456° * $
* 457 * $    15 = total horiz(Btu/ft-hr), 22 = diffuse horiz(Btu/ft-hr),
* 458 * $    21 = direct normal(Btu/ft-hr), 4 = dbt (F), 19 = dpt (F)
* 459 * $    9 = wind direction (15degs), 17 = wind speed (knots),
* 460 * $    4 = cldamt (10ths)
* 461 * $
* 462 *          HRSCH SCHEDULE THRU DEC 7 (ALL) (1,24) VALUES=(0)
* 463 *                                THRU DEC 25 (ALL) (1,24) VALUES=(1)
* 464 *                                THRU DEC 31 (ALL) (1,24) VALUES=(0) ..
* 465 *          LHR HOURLY-REPORT REPORT-SCHEDULE=HRSCH
* 466 *          REPORT-BLOCK= (OUT-AMBIENT) ..
* 467 * END ..
* 468 *
* 469 * COMPUTE LOADS ..
* 470 *

```

CURRICULUM VITAE

Siendo originario de Banderilla, Ver., realicé mis estudios básicos, medios y superiores en la ciudad de Xalapa, Ver., cursando la licenciatura en Arquitectura en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Veracruzana, entre 1990 y 1995, año en el que me titulé con la tesis "Ecotécnicas en el diseño de una vivienda aislada. La autosuficiencia energética y de servicios en el clima templado-húmedo en el estado de Veracruz".

A finales del mismo año ingresé a la Universidad Autónoma Metropolitana para cursar la Maestría en Diseño, en la línea de Arquitectura Bioclimática, grado para el cual se presenta el presente documento.

En el ámbito profesional inicio mis labores de manera formal en 1993, al integrar en sociedad con tres arquitectos más el despacho "Calli Arquitectura", empresa que permanece activa durante más de seis meses disolviéndose finalmente ante el exceso de trabajo en nuestros estudios.

Una vez concluida la carrera, he participado con algunos arquitectos y de manera independiente en diferentes proyectos, ingresando a finales de 1998 a Banco Nacional de México S.A., Institución en la cual laboro hasta el momento.

De manera paralela a la presente investigación, en 1997 se publicaron dos artículos que elaboré acerca de los modelos de simulación analizados en esta tesis, el primero de ellos presentado en la XXI Semana Nacional de Energía Solar (ANES) mientras que el segundo apareció en el Primer Anuario de Estudios de Arquitectura Bioclimática de la UAM Azcapotzalco.

Independientemente al ámbito académico, entre 1988 y 1998 participe de manera activa en el Campamento Lomas Pinar A.C., asociación en la cual ocupé los cargos de Presidente Regional, Coordinador de Zona y Presidente Nacional, realizando actividades recreativas enfocadas a la formación humana y espiritual de la niñez y la juventud mexicana.

Fernando Francisco Velasco Montiel

14 de Abril de 1999.