

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**DEPARTAMENTO DE TERMODINÁMICA APLICADA**



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**

**TESIS DOCTORAL**

**CÁLCULO DE SOMBRAS EN  
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN  
TÉRMICA DE EDIFICIOS**

**Autor:**

**EMILIO JOSÉ SARABIA ESCRIVÀ**

**Director:**

**VÍCTOR MANUEL SOTO FRANCÉS**

**VALENCIA, MARZO 2010**





A Vane, la meua dona.

A Roser, la nostra il.lusió.

A la família, pel seu suport.



Agradecimientos:

A Víctor Soto, mi director de tesis, por su labor de tutorización durante estos años en el departamento y en la realización de este trabajo.

A todos los compañeros del grupo de investigación FREDSOL: Jose Manuel Pinazo, Antonio García, Guillermo Pichetto, Juan Antonio Larumbe y Edwin Lamas, por sus acertados consejos, su confianza y por su apoyo desde mi llegada al departamento.



## **RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL**

Una de las medidas que están tomando los gobiernos con el fin de paliar el efecto de la acción humana sobre el clima es disminuir el consumo energético de los países. En el sector residencial y terciario, esta acción se aplica en buscar sistemas más eficientes para obtener el confort térmico necesario en las viviendas.

Para evaluar la eficiencia energética del edificio hace falta hacer una simulación energética del mismo. Una simulación energética implica un cálculo más detallado de los procesos de transferencia de calor que existen en el edificio. Y uno de los factores que más influyen en el comportamiento térmico del edificio es la cantidad de radiación directa solar que llega a los mismos.

En la siguiente tesis doctoral se analizan las distintas metodologías que utilizan los programas de simulación existentes para el cálculo de radiación y sombras sobre el edificio. Como aportación a esta campo se estudia la aplicación del método llamado “Shadow Volumes” en este tipo de aplicaciones, con lo que se obtienen unos cálculos más rápidos y precisos de sombras sobre el edificio, y con ello una estimación más exacta a la radiación incidente sobre los mismos.

En la tesis también se trata el tema de la interoperabilidad entre distintas aplicaciones, haciendo hincapié en la comunicación entre un programa de análisis térmico de edificios y un programa de tipo CAD para la definición geométrica del mismo. De esta manera se analiza el uso del formato DXF para la comunicación entre ambas aplicaciones.

Finalmente se describe la metodología empleada en el programa vpCLIMA para la simulación térmica del edificio, y cómo se aplica el método “Radiant Time Series” a cada uno de los agentes que influyen en el comportamiento térmico del edificio.



## **SUMMARY OF PhD THESIS**

One of the measures taken by governments to alleviate the effect of human activity on climate is to reduce energy consumption in countries. In the residential and tertiary sector, this action applies to seek more efficient systems for thermal comfort in buildings.

To assess the energy efficiency of buildings it is necessary a computational simulation of it. An energy simulation involves a more detailed calculation of heat transfer processes existing in the building. One of the factors that influence the thermal behaviour of the building is the amount of direct solar radiation that reaches them.

This thesis analyses various methodologies used by existing simulation programs for calculating direct radiation and shadows on buildings. As a contribution to this field the method called "Shadow Volumes" is studied in this type of applications. With this method we obtained a much faster and more accurate calculations of shadows on buildings, and thus, a more accurate estimate of the radiation incident on them.

Interoperability between different applications is studied in this thesis, too. Especially, the communication between thermal analysis building software and CAD applications for the geometric definition of it. Thus examines the use of the DXF format for communication between both applications.

Finally, it describes the methodology used in the thermal simulation software vpCLIMA, and how it applies the method "Radiant Time Series" to each of the factors involved in the thermal performance of the building.

## **RESUM DE TESIS DOCTORAL**

Una de les mesures que estan prenent els governs per tal de pal·liar l'efecte de l'acció humana sobre el clima és disminuir el consum energètic dels països. En el sector residencial i terciari, aquesta acció s'aplica a buscar sistemes més eficients per obtenir el confort tèrmic necessari en els habitatges.

Per avaluar l'eficiència energètica de l'edifici cal fer una simulació energètica d'aquest. Una simulació energètica implica un càlcul més detallat dels processos de transferència de calor que hi ha a l'edifici. I un dels factors que més influeixen en el comportament tèrmic de l'edifici és la quantitat de radiació directa solar que arriba als mateixos.

En aquesta tesi doctoral s'analitzen les diferents metodologies que utilitzen els programes de simulació existents per al càlcul de radiació i ombres sobre l'edifici. Com a aportació a aquest camp s'estudia l'aplicació del mètode anomenat "Shadow Volumes" en aquest tipus d'aplicacions, de manera que s'obtenen uns càlculs més ràpids i precisos d'ombres sobre l'edifici, i amb això una estimació més exacta de la radiació incident sobre els mateixos.

A la tesi també es tracta el tema de la interoperabilitat entre diferents aplicacions, posant l'accent en la comunicació entre un programa d'anàlisi tèrmic d'edificis i un programa de tipus CAD per a la definició geomètrica del mateix. D'aquesta manera s'analitza l'ús del format DXF per a la comunicació entre les dues aplicacions.

Finalment es descriu la metodologia emprada en el programa vpCLIMA per a la simulació tèrmica de l'edifici, i com s'aplica el mètode "Radiant Time Series" a cada un dels agents que influeixen en el comportament tèrmic de l'edifici.



# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA .....</b>	<b>i</b>
<b>1. OBJETIVOS DE LA TESIS .....</b>	<b>2</b>
1.1. MOTIVACIÓN .....	2
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	2
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	3
<b>2. TRATAMIENTO DE LAS SOMBRAS EN LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN TÉRMICA.....</b>	<b>5</b>
2.1. ALGORITMOS DE CÁLCULO DE SOMBRAS EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN TÉRMICA .....	6
2.1.1. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS EN FORMA DE MALLA CUADRICULADA .....	6
2.1.2. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS EN FORMA DE BARRAS .....	7
2.1.3. MÉTODO DE CÁLCULO DE POLÍGONOS CONVEXOS CON COORDENADAS HOMOGENEAS .....	11
2.1.4. MÉTODO DE CÁLCULO DE POLÍGONOS CÓNCAVOS EVALUANDO SU CONTORNO .....	15
2.1.5. SHADOW MASKS .....	19
2.1.6. BACKWAY RAY TRACING.....	21
2.1.7. TRNSHD-APLICACIÓN PARA TRNSYS.....	23
2.2. INTEGRACIÓN DE LOS CÁLCULOS EN LOS PROGRAMAS .....	23
2.2.1. NIVELES DE CÁLCULO.....	24
2.2.2. PERIODOS DE CÁLCULO.....	24
2.3. TRATAMIENTO DE LA RADIACIÓN DIFUSA.....	25
2.4. TRATAMIENTO DE LA RADIACIÓN REFLEJADA .....	27
2.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO .....	30
<b>3. ALGORITMOS DE GENERACIÓN DE SOMBRAS EN COMPUTACIÓN .....</b>	<b>32</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	32
3.2. SHADOW VOLUME BINARY SPACE PARTITION TREES.....	33
3.2.1. SHADOW VOLUMES.....	33
3.2.2. BINARY SPACE PARTITION TREE (BSP TREES).....	34
3.2.3. SHADOW VOLUMES BINARY SPACE PARTITION TREES (SVBSP) .....	47
3.2.4. FUNCIONAMIENTO MÉTODO SHADOW VOLUMES.....	48
3.2.5. EJEMPLOS APLICACIÓN DEL MÉTODO SHADOW VOLUMES .....	54
3.2.6. VENTAJAS FRENTE OTROS MÉTODOS .....	67
3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO SVBSP TREES A UN ENTORNO CAD.....	67
3.3.1. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE LUZ DE LA ESCENA .....	68

3.3.2.	GENERACIÓN DEL LISTADO DE CARAS .....	69
3.3.3.	CREACIÓN DE LOS POLÍGONOS DE SOMBRA.....	69
3.3.4.	ESQUEMA RESUMEN DEL PROCESO .....	70
3.4.	BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO .....	72
<b>4.</b>	<b>  APLICACIÓN SOBRE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN TÉRMICA.....</b>	<b>73</b>
4.1.	GENERACIÓN DE LOS POLÍGONOS DE ESCENA .....	73
4.1.1.	GENERACIÓN DEL CONTORNO.....	73
4.1.2.	GENERACIÓN DE LAS CAPAS DEL DOCUMENTO.....	77
4.1.3.	INTERSECCIÓN DE ESPACIOS EN HORIZONTAL.....	78
4.1.4.	INTERSECCIÓN DE ESPACIOS EN VERTICAL.....	79
4.1.5.	GENERACIÓN DE POLILÍNEAS DE LOS CERRAMIENTOS.....	80
4.1.6.	GENERACIÓN DE LOS HUECOS.....	81
4.1.7.	VENTAJAS .....	82
4.2.	DETERMINACIÓN DE LAS POSICIONES SOLARES DE ANÁLISIS .....	82
4.3.	CÁLCULO DE LA FRACCIÓN SOLEADA.....	89
4.4.	BIBLIOGRAFÍA.....	90
<b>5.</b>	<b>  INTEROPERABILIDAD.....</b>	<b>91</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	91
5.2.	EL CONCEPTO DE BIM .....	92
5.3.	EL FORMATO DE DATOS IFC.....	93
5.4.	FORMATO FIDE (Formato de Intercambio de Datos de la Edificación).....	94
5.5.	EL FORMATO DXF (Drawing eXchange Format).....	96
5.5.1.	ORIGEN .....	96
5.5.2.	CARACTERÍSTICAS .....	96
5.6.	BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO .....	96
<b>6.</b>	<b>  ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN TÉRMICA DEL EDIFICIO EN EL FORMATO   DXF.97</b>	
6.1.	ESTRUCTURA DEL FORMATO DXF.....	97
6.2.	DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA EN EL ARCHIVO DXF.....	100
6.3.	INFORMACIÓN NO GEOMÉTRICA EN EL ARCHIVO DXF .....	101
6.4.	LIBRERÍA DIME .....	103
6.5.	ADAPTACIÓN DE LA LIBRERÍA DIME PARA UNA APLICACIÓN TÉRMICA.....	106
6.5.1.	XDATA .....	106
6.5.2.	CERRAMIENTOS .....	109
6.5.3.	HUECOS .....	112
6.5.4.	LOCALES .....	114

6.5.5.	CONTORNO .....	115
6.5.6.	CAPAS .....	116
6.5.7.	XRECORD Y XRECORDDATA .....	117
6.5.8.	ZONAS, PLANTAS Y EDIFICIO .....	118
6.5.9.	COMPOSICIONES .....	120
6.5.10.	DISTRIBUCIONES.....	121
6.6.	BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO .....	121
<b>7.</b>	<b>ESTRUCTURA ORIENTADA A OBJETOS DE LA INFORMACIÓN TÉRMICA DEL EDIFICIO .....</b>	<b>122</b>
7.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS (POO) ...	122
7.2.	VENTAJAS DE LA ESTRUCTURA MODULAR.....	124
7.3.	TIPO DE CARGAS TÉRMICAS DE UN EDIFICIO .....	125
7.4.	ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN.....	127
7.5.	ORGANIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ELEMENTO SIMULADOR .....	129
7.5.1.	LA CLASE SIMULADOR.....	129
7.5.2.	LA CLASE CONDEXT .....	130
7.5.3.	LA CLASE ELEMSIM .....	131
7.5.4.	LA CLASE EDIFICIO .....	133
7.5.5.	LA CLASE LOCAL .....	135
7.5.6.	LA CLASE OBSERVADOR .....	136
7.6.	BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO .....	137
<b>8.</b>	<b>METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS .....</b>	<b>138</b>
8.1.	MÉTODOS MÁS IMPORTANTES .....	138
8.1.1.	MÉTODO DEL BALANCE.....	138
8.1.2.	MÉTODO DE LAS SERIES TEMPORALES RADIANTES.....	139
8.2.	TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS EXTERIORES .....	149
8.2.1.	FACTORES DE RESPUESTA .....	149
8.2.2.	COEFICIENTE GLOBAL DE CONVECCIÓN-RADIACIÓN INTERIOR Y TEMPERATURA INTERIOR .....	152
8.2.3.	COEFICIENTE GLOBAL DE CONVECCIÓN-RADIACIÓN EXTERIOR Y TEMPERATURA SOL-AIRE.....	154
8.3.	TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE MUROS Y SUELOS ENTERRADOS .....	156
8.4.	TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS EN CONTACTO CON LOCALES NO CALEFACTADOS .....	158
8.5.	TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE SUPERFICIES SEMITRASPARENTES	159
8.5.1.	REFLEXIÓN, ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN DE RADIACIÓN EN UNA SUPERFICIE ACRISTALADA.....	160
8.6.	TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE PUENTES TÉRMICOS.....	164

8.7.	CARGAS DEBIDAS A LA VENTILACIÓN E INFILTRACIONES.....	165
8.8.	CARGA APORTADA POR LOS OCUPANTES.....	166
8.9.	CARGAS DEBIDAS A LA ILUMINACIÓN .....	167
8.10.	CARGAS DEBIDAS A EQUIPOS.....	168
8.11.	BALANCE TÉRMICO DE UN LOCAL.....	168
8.12.	BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO .....	172
<b>9.</b>	<b>APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....</b>	<b>173</b>
9.1.	DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO DE REFERENCIA .....	173
9.2.	RESULTADOS OBTENIDOS .....	175
9.3.	VISTAS DEL PROGRAMA.....	183
9.4.	TIEMPOS DE CÁLCULO.....	187
9.5.	ANÁLISIS DE LOS RETRANQUEOS DE LOS HUECOS .....	189
9.5.1.	LA NUEVA ESCENA DE CÁLCULO.....	190
9.5.2.	EFECTO DEL RETRANQUEO EN LOS HUECOS .....	193
9.6.	ANÁLISIS DE LA INSOLACIÓN DE UN EDIFICIO SEGÚN SU CONFIGURACIÓN..	196
9.7.	ÍNDICE DE PROTECCIÓN SOLAR DEL EDIFICIO .....	201
9.8.	ÍNDICE DE REDUCCIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR DIRECTA .....	204
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>208</b>
10.1.	CONCLUSIONES .....	208
10.2.	TRANSMITANCIAS NO CERO EN EL BSP TREE .....	209
10.3.	CÁLCULO DE POLÍGONOS INTERIORES .....	210
<b>I.</b>	<b>ANEXO : COORDENADAS HOMOGÉNEAS .....</b>	<b>212</b>
<b>II.</b>	<b>ANEXO: ESTRUCTURA DE LOS ARCHIVOS CON FORMATO DXF .....</b>	<b>216</b>
<b>III.</b>	<b>ANEXO3 : FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS EXTERIORES .....</b>	<b>220</b>
III.1.	ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE UN MURO .....	220
III.2.	CONDICIONES DE CONTORNO .....	221
III.3.	SOLUCIÓN ANALÍTICA POR TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	222
III.4.	FUNCIONES DE RESPUESTA .....	224
<b>IV.</b>	<b>ANEXO : CÁLCULO DE LA TEMPERATURA SOL-AIRE.....</b>	<b>227</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: La superficie de análisis mallada en 8x6 elementos.....	7
Figura 2: Escena con tres polígonos ocluidores y un polígono receptor de las sombras... 8	8
Figura 3: Creación del espacio de trabajo para el polígono con un rectángulo sobrescrito y dividido en barras de igual anchura.....	9
Figura 4: Transformación de la posición del sol de un sistema de coordenadas a otro....	9
Figura 5: Transformación de los vértices de los polígonos ocluidores al sistema de referencia principal.....	10
Figura 6: Polígono dividido en barras y proyección de la sombra sobre las mismas.....	10
Figura 7: Superposición de los polígonos A y B.....	12
Figura 8: Distintas combinaciones de posiciones entre los polígonos A y B.....	12
Figura 9: Superposición de los polígonos A y B.....	13
Figura 10: Intersección de la arista a-b del polígono A con la e-i del polígono B.....	13
Figura 11: Procesado de la arista b-c del polígono A.....	14
Figura 12: procesado de las dos aristas restantes del polígono A.....	14
Figura 13: Polígonos de la escena inicial.....	15
Figura 14: Primera comparación entre aristas de polígonos.....	15
Figura 15: Intersección de las aristas A-B del polígono ocluidor con b-c del polígono receptor.....	16
Figura 16: Intersección aristas A-B con d-a.....	16
Figura 17: Comparativa de las aristas del polígono receptor frente a la arista B-C del polígono ocluidor.....	16
Figura 18: Comparativa de las aristas frente a la arista C-A.....	17
Figura 19: Inicio de la fase de comprobación del listado de vértices del polígono ocluidor.....	17
Figura 20: Representación del segmento 2-1 perteneciente a la secuencia de comprobación e inicio del listado del nuevo polígono.....	18
Figura 21: La figura superior muestra el listado de vértices que van conformando la intersección. La figura inferior muestra el listado de vértices de del polígono ocluidor y receptor y el orden de comprobación seguido.....	18
Figura 22: Representación del polígono final calculado y de la secuencia de vértices del cálculo.....	19
Figura 23: Mapa estereográfico representativo de la escena que se observa.....	19
Figura 24: Escena con la bóveda que representa el mapa estereográfico con las proyecciones de los edificios del entorno.....	20
Figura 25: Representación del mapa estereográfico.....	20
Figura 26: Distintos tipos de subdivisiones del mapa estereográfico.....	21
Figura 27: Método de la radiosidad.....	21
Figura 28: Radiación directa.....	22
Figura 29: Radiación difusa.....	22
Figura 30: Radiación reflejada.....	22
Figura 31: distribución de la luminancia en el cielo claro para las alturas solares de 20° y 40°.....	25
Figura 32: Distribución de radiación difusa descrita por Perez et al., 1990.....	26
Figura 33: Radiación reflejada en los elementos de sombra.....	27
Figura 34: Radiación reflejada entre las superficies del propio edificio debido a la geometría del mismo.....	28
Figura 35: Radiación que llega al terreno y posteriormente refleja.....	28



Figura 36: Despliegue de rayos del método Ray-tracing aplicado a un punto de la ventana.....	29
Figura 37: Análisis por Ray-tracing de un punto del plano del terreno. ....	29
Figura 38: Esquema de cálculo de la radiación reflejada especular. ....	30
Figura 39: Representación de la técnica de sombras proyectivas .....	32
Figura 40: Representación del mapa de sombras de una escena. ....	33
Figura 41: Volumen de sombra generado por un polígono formado por la parte interior de los tres planos de sombra señalados. ....	34
Figura 42: Escena inicial con polígonos.....	39
Figura 43: Inserción del plano “p1” e inicio del árbol BSP. ....	39
Figura 44: Escena inicial con los planos de división p1, p2 y p3. En la parte derecha se representa el árbol BSP de la escena. ....	40
Figura 45: Planos p1, p2 y p3 sobre la escena inicial y su representación en árbol BSP. ....	40
Figura 46: Escena inicial y árbol BSP completo. ....	41
Figura 47: Poliedro que se va a definir en forma de árbol BSP. ....	42
Figura 48: Poliedro inicial con el primer plano “a” de la escena. ....	42
Figura 49: Poliedro inicial con dos planos y su representación en árbol BSP. ....	43
Figura 50: Representación de tres caras del poliedro en el árbol BSP. ....	43
Figura 51: Incorporación de la cara d representada por los planos d’ y d’’ y colocación de los mismos sobre el árbol BSP. ....	44
Figura 52: Incorporación del plano “e” en la escena y en el árbol BSP.....	45
Figura 53: Incorporación de la cara f que debe ser dividida en dos. ....	45
Figura 54: Representación final de la escena con todos los planos de las caras y su colocación en el árbol BSP. ....	46
Figura 55: Escena inicial de polígonos en 2D. ....	49
Figura 56: Representación de la escena con el orden de polígonos A-D-B-C. ....	49
Figura 57: Representación de la escena con el orden de polígonos B-C-D-A. ....	50
Figura 58: Diagrama de flujo del algoritmo front-to-back para la ordenación de los polígonos de una escena mediante el árbol BSP. ....	51
Figura 59: Escena inicial con un punto de luz y árbol BSP de la misma. ....	52
Figura 60: Pasos del algoritmo de ordenación de los polígonos respecto al punto de luz. ....	53
Figura 61: Algoritmo de generación del árbol SVBSP. ....	54
Figura 62: Escena inicial compuesta por dos polígonos planos y una esfera de luz. ....	55
Figura 63: Representación del plano de sombra generado por el eje AB y el punto de luz. ....	55
Figura 64: Creación del plano de sombra BC e incorporación del mismo en el árbol BSP. ....	56
Figura 65: Representación del primer polígono de la escena en el árbol BSP.....	56
Figura 66: Representación de la pirámide de sombra del polígono inicial representada en el árbol BSP adjunto. ....	57
Figura 67: Escena inicial con la proyección de los planos de sombra sobre el plano del segundo polígono.....	57
Figura 68: Proceso de clasificación y colocación del polígono E-F-G-H en el árbol SVBSP respecto al nodo AB. ....	58
Figura 69: Proceso de clasificación y colocación del polígono E-F-G-H en el árbol SVBSP respecto al nodo BC. ....	58
Figura 70: Creación del nodo EF e inserción del mismo en el árbol SVBSP. ....	59

Figura 71: Creación de los planos de sombra del polígono E-F-G-H y ubicación de los mismos en la estructura del árbol SVBSP.....	59
Figura 72: Representación de los volúmenes de sombra sobre la escena y del árbol SVBSP que los representa.....	60
Figura 73: Escena inicial compuesta por dos poligonos planos y una esfera de luz.....	60
Figura 74: Inicio de la generación del árbol SVBSP con el primer polígono de la escena.....	61
Figura 75: Representación de los dos planos de la escena y las líneas de corte de los planos de sombra.....	61
Figura 76: Representación del proceso de clasificación del polígono dentro del árbol SVBSP.....	61
Figura 77: Escena final con el segundo polígono dentro del volumen de sombra.....	62
Figura 78: Escena inicial compuesta por dos poligonos planos y una esfera de luz.....	62
Figura 79: Representación del primer polígono de la escena y el volumen de sombras que genera el mismo sobre el segundo polígono de la escena.....	62
Figura 80: Clasificación del nuevo polígono respecto al nodo inicial.....	63
Figura 81: División del polígono inferior en dos y ubicación del polígono i1-i2-E-F en el árbol SVBSP.....	63
Figura 82: Clasificación del polígono i1-G-H-i2 respecto al plano BC.....	64
Figura 83: División del polígono i1-G-H-i2 en dos polígonos y ubicación del polígono de la parte iluminada en el árbol SVBSP.....	64
Figura 84: Representación del plano de sombras CD sobre el polígono i1-i3-i4-H-i2..	65
Figura 85: División del polígono i1-i3-i4-H-i2 y ubicación de los nodos del árbol SVBSP.....	65
Figura 86: Clasificación del polígono i1-i3-i6-i5-H-i2 respecto al plano DA.....	66
Figura 87: Incorporación en el árbol SVBSP el polígono i7-H-i2-i8.....	66
Figura 88: Representación final de la escena con los dos polígonos y la proyección de la sombra de uno sobre otro.....	67
Figura 89: Ilustración de los volúmenes de sombra generados por los polígonos de la escena y el árbol SVBSP que lo representa.....	67
Figura 90: Posiciones solares de análisis en la aplicación.....	68
Figura 91: Polígonos que representan el contorno del edificio en CAD.....	69
Figura 92: Representación de los polígonos del contorno y los polígonos de sombra sobre los mismos.....	69
Figura 93: Esquema proceso cálculo de sombras con librería SVBSP Tree.....	71
Figura 94: Planos de partida del edificio.....	74
Figura 95: representación de los distintos contornos térmicos de cada una de las plantas que conforman el edificio.....	74
Figura 96: Modelo geométrico del edificio que se empleará en la simulación.....	75
Figura 97: Colocación de las plantas en posición y cota correspondiente y representación 3D del edificio.....	76
Figura 98: Edificio en CAD y representación en forma de árbol en la macro de VBA.....	76
Figura 99: Pantalla de asignación de propiedades de composición a cada capa del archivo.....	78
Figura 100: Representación de los cerramientos exteriores, líneas de color verde, y cerramientos interiores, líneas de color naranja.....	79
Figura 101: Representación de los forjados en forma de polilíneas, en naranja los interiores, en azul los exteriores y en violeta los forjados al terreno de la planta baja..	80
Figura 102: Generación de una pared exterior, el sentido de los vértices es antihorario.....	81

Figura 103: Generación de las paredes del edificio en sentido antihorario.....	81
Figura 104: Representación de las ventanas en la estructura del edificio. ....	82
Figura 105: Sistema de referencia ecuatorial local u horario .....	83
Figura 106: Representación de la declinación según el diaJuliano. ....	83
Figura 107: Sistema de referencia horizontal.....	84
Figura 108: Trayectorias solares más representativas (desde enero hasta mayo) para una posición de latitud 40° Norte. ....	85
Figura 109: Sombras proyectadas sobre la escena inicial en el mes de marzo a las 16h solares para el edificio situado en una latitud norte de 40°. ....	89
Figura 110: Pantalla de la macro para visualizar los polígonos de sombra en el periodo deseado. ....	90
Figura 111: Esquema BIM, la información del edificio es compartida por los distintos agentes que intervienen en ella: constructores, arquitectos, propietarios, ingenieros, etc. ....	93
Figura 112: Esquema de trabajo con aplicaciones que utilizan el formato IFC. ....	94
Figura 113: Esquema general del fichero FIDE.....	95
Figura 114: representación del record formado por el group value y el valor asociado. ....	97
Figura 115: Estructura del formato DXF.....	99
Figura 116: Introducción de datos no geométricos XDATA asociados a entidades geométricas LWPolyline. ....	101
Figura 117: Almacenamiento de datos no geométricos en una capa del documento... ..	102
Figura 118: Ubicación del elemento Xrecord en el formato dxf.....	103
Figura 119: Esquema de la jerarquía que aparece en la librería dime. ....	104
Figura 120: Ejemplo de la jerarquía de objetos que descienden de la clase dimeBase en la librería DIME .....	105
Figura 121: Estructura jerárquica de la clase dimeEntity.....	106
Figura 122: Formato del elemento Xdata añadido a una entidad genérica. ....	108
Figura 123: esquema jerárquico de la clase dimeBase con las dos clases incorporadas dimeXdata y dimeAtributo. ....	108
Figura 124: Esquema jerárquico de la clase dimeAtributo y sus descendientes. ....	116
Figura 125: Representación de los elementos Xrecord dentro de la sección de Objects y de los XrecordData dentro de los Xrecord. ....	118
Figura 126: Representación de una clase llamada “figura geométrica”y tres objetos creados a partir de ésta en programación orientada a objetos. ....	123
Figura 127: Agentes que influyen en las características térmicas del edificio.....	125
Figura 128: Características térmicas para distintas composiciones de muros.....	126
Figura 129: Esquema de introducción de datos para crear el archivo DXF.....	127
Figura 130: Estructura de elementos cargada en la aplicación VPCLIMA después de leer e interpretar un archivo DXF.....	128
Figura 131: Esquema general de la aplicación creada.....	129
Figura 132: clase en la que se almacenan los datos referentes a las condiciones exteriores del proyecto.....	130
Figura 133: Clase del elemento a simular. ....	131
Figura 134: Conexión entre elementos de la estructura de simulción y el archivo DXF. ....	132
Figura 135: Clase edificio y elementos que la conforman. ....	133
Figura 136: Clase local y la conexión con cerramientos y huecos.....	135
Figura 137: Representación de la excitación en temperatura y flujos de calor superficiales.....	150
Figura 138 :La función triángulo utilizada como elemento formador (hold function). ....	152

Figura 139: Balance flujos de calor en superficie interior del muro. ....	153
Figura 140: Balance de calor en superficie exterior del muro. ....	154
Figura 141: Intercambios de energía de un cerramiento semitransparente. ....	160
Figura 142: Representación de la incidencia de la radiación sobre el vidrio. ....	160
Figura 143: Vista superior acotada del edificio utilizado para la validación. ....	173
Figura 144: Vista en planta acotada del edificio utilizado para la validación. ....	173
Figura 145: Vista axonométrica del edificio utilizado para la validación. ....	174
Figura 146: Vista renderizada del edificio utilizado para la validación. ....	174
Figura 147: Edificio ejemplo con el voladizo incorporado. ....	175
Figura 148: Representación de los polígonos de sombra obtenidos en el vpCLIMA y la imagen renderizada del programa DesignBuilder. ....	186
Figura 149: Filtro creado en la macro de AutoCAD para visualizar solamente las sombras del periodo seleccionado. ....	187
Figura 150: colocación del polígono de ventana sobre el polígono de superficie. ....	189
Figura 151: Escena con retranqueo en la ventana. ....	190
Figura 152: Elementos que forman el retranqueo, con las normales de los polígonos apuntando hacia fuera para el cálculo correcto. ....	190
Figura 153: Cerramiento exterior dividido en dos para poder representar el hueco. ...	191
Figura 154: División múltiple del cerramiento exterior por los huecos. ....	191
Figura 155: polígonos que conforman la escena para el cálculo sobre el hueco. ....	192
Figura 156: proyección de las sombras sobre la superficie exterior del edificio. ....	192
Figura 157: proyección de las sombras sobre la superficie interior del hueco. ....	193
Figura 158: Representación de la variación de la fracción solar debido al efecto de un retranqueo de 20 cm. en la ventana. ....	194
Figura 159: Representación de la variación de la fracción solar debido al efecto de un retranqueo de 40 cm. en la ventana. ....	195
Figura 160: Posibles orientaciones y disposiciones para la configuración lineal del edificio. ....	199
Figura 161: Disposiciones estudiadas con doble altura del edificio. ....	200
Figura 162: Irradiación diaria sobre las distintas configuraciones de edificios. ....	200
Figura 163: Representación de la irradiación anual sobre cada una de las configuraciones estudiadas. ....	201
Figura 164: Escena en donde los polígonos oclusores presentan una transmitancia distinta de cero. ....	209
Figura 165: Árbol SVBSP en el que se aplican las transmitancias de los polígonos. ...	210
Figura 166: Sombras generadas sobre la superficie exterior del hueco y proyectadas a la superficie interior del mismo. ....	211
Figura 167: Vista interior de un espacio y proyección interior de la radiación directa. ....	211
Figura 168: La función triángulo utilizada como elemento formador (hold function). ....	225
Figura 169: Construcción del elemento formador triángulo. ....	225
Figura 170: Balance flujos de calor en muro exterior. ....	227

## ÍNDICE DE CÓDIGOS

Código 1: Estructura nodo árbol BSP .....	36
Código 2: Construcción árbol BSP.....	37
Código 3: Función para clasificar un punto respecto de un plano. ....	47
Código 4: Ordenación de los polígonos del árbol BSP desde el plano más cercano a la luz al más alejado. ....	51

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores ligeras con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	141
Gráfica 2: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores ligeras sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	141
Gráfica 3: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores de peso medio con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	142
Gráfica 4: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores de peso medio sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	142
Gráfica 5: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores pesadas con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio. ....	143
Gráfica 6: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores pesadas sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio. ....	143
Gráfica 7: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con todas las paredes interiores sin revestimiento de alfombra en el suelo. ....	144
Gráfica 8: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con todas las paredes interiores con revestimiento de alfombra en el suelo. ....	144
Gráfica 9: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores ligeras con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	145
Gráfica 10: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores ligeras sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	145
Gráfica 11: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores de peso medio con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	146
Gráfica 12: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores de peso medio sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.....	146
Gráfica 13: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores pesadas con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio. ....	147
Gráfica 14: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores pesadas sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio. ....	147
Gráfica 15: Radiación solar directa normal y difusa en vpCLIMA y DesignBuilder para el mes de mayo. ....	175
Gráfica 16: Radiación sobre la ventana a lo largo de un día característico de mayo. ...	176
Gráfica 17: Radiación sobre una ventana sin protecciones y con protecciones a lo largo de un día característico de mayo.....	177
Gráfica 18: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 0,5m. a lo largo de un día característico de mayo. ....	178
Gráfica 19: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 0,75m. a lo largo de un día característico de mayo. ....	179

Gráfica 20: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 1 m. a lo largo de un día característico de mayo. ....	179
Gráfica 21: Radiación solar directa normal y difusa en vpCLIMA y DesignBuilder para el mes de junio. ....	180
Gráfica 22: Radiación sobre la ventana sin alero a lo largo de un día característico de junio. ....	180
Gráfica 23: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 1 m. a lo largo de un día característico de junio. ....	181
Gráfica 24: Radiación solar directa normal y difusa en vpCLIMA y DesignBuilder para el mes de julio. ....	181
Gráfica 25: Radiación sobre la ventana a lo largo de un día característico de julio. ....	182
Gráfica 26: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 1 m. a lo largo de un día característico de julio. ....	183



# **1. OBJETIVOS DE LA TESIS**

## **1.1. MOTIVACIÓN**

Una de las líneas de investigación del departamento de Termodinámica Aplicada está dedicada a estudiar y analizar el comportamiento térmico de los edificios. Una de las características del método de trabajo empleado es la transferencia de los conocimientos y la aplicación de los mismos en la elaboración de aplicaciones informáticas que sean capaces de proporcionar datos y resultados fiables y precisos para ingenieros, arquitectos y cualquiera de los profesionales dedicados al sector del diseño de edificios.

Durante los últimos años el grupo ha implementado distintas aplicaciones informáticas que han tenido una buena acogida entre los profesionales, una de estas aplicaciones es el programa de cálculo de cargas térmicas dpClima, el cual tiene como objetivo orientar al proyectista en el diseño de instalaciones de climatización para edificios.

La evolución energética mundial en estos últimos años ha cambiado de orientación, y en el sector de la edificación no ha pasado de largo. Si el principal objetivo de los proyectistas hasta hace unos años era el diseño de la instalación para que esta fuera suficiente en las condiciones más desfavorables, ahora esta tendencia está cambiando. El reciente Código Técnico de la Edificación (CTE) centra uno de sus capítulos en el ahorro de energía del edificio. Por tanto hay que añadir un nuevo parámetro en el diseño de edificios, la eficiencia energética del mismo.

Para evaluar la eficiencia energética del edificio es necesario realizar una simulación energética del mismo. Una simulación energética implica un cálculo más detallado de los procesos de transferencia de calor que existen en el edificio.

En esta tesis se pretende hacer una descripción del trabajo realizado en el desarrollo de un nuevo programa informático, vpCLIMA, el cual permite realizar cálculos de cargas térmicas y cálculos de demanda energética para climatización del edificio. Se analiza con más detenimiento el tratamiento que se emplea para el cálculo de la radiación directa, haciendo uso de una metodología llamada “Shadow Volumes” para el cálculo de sombras en el edificio.

## **1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO**

Al tratarse de un trabajo original, como se requiere para una tesis doctoral, se describen con detalle los puntos en donde se han aplicado nuevos enfoques para la realización del programa. Estas nuevas ideas hacen que los resultados del programa sean más precisos, además aportan una mejor gestión de la información e interoperabilidad con otras aplicaciones. Los puntos más importantes del estudio se comentan a continuación:



- Creación de una estructura jerárquica orientada a objetos y en lenguaje de programación C++ en la que se describe cada uno de los elementos del edificio.

Un edificio puede considerarse como un sistema complejo de estructura jerárquica. Existen distintos niveles de elementos, los cerramientos y los huecos pertenecen a los niveles más bajos de la estructura, es un nivel más de detalle, mientras que las zonas, las plantas o el edificio en conjunto se sitúan en el nivel jerárquico superior. La programación orientada a objetos permite estructurar la información de una manera jerárquica y ordenada, estableciendo la correspondiente relación entre los distintos elementos que forman el sistema edificio.

- Interoperabilidad con una aplicación CAD para la introducción de la geometría del edificio y el uso de la información ya disponible del edificio.

Durante el proceso de diseño de un edificio intervienen multitud de agentes para el desarrollo de subproyectos asociados al mismo, arquitectura, electricidad, diseño de interiores, climatización, fontanería, etc. Todos ellos necesitan intercambiar información sobre el proyecto para poder desarrollar sus estudios, por este motivo resulta interesante que todos puedan intercambiar información sobre el mismo y aprovechar la información que existe con el fin de no tener que volver a insertarla en las aplicaciones informáticas correspondientes para cada tipo de proyecto. En el caso de aplicaciones dedicadas al cálculo de instalaciones térmicas y cálculo de demanda energética resulta interesante aprovechar la información que los arquitectos aportan en sus planos CAD y ese es uno de los objetivos de este trabajo.

- Aplicación del algoritmo Shadow Volumes para el cálculo de las sombras del edificio y posterior procesado de la información obtenida.

El algoritmo de Shadow Volumes utiliza volúmenes poligonales para delimitar las regiones de sombra de una escena. Un Shadow Volume (volumen de sombra) es un poliedro formado por semi-infinitos cuadriláteros llamados polígonos de sombra que delimitan la región espacial en la que existe sombra debida a alguno de los polígonos que forman la escena. Otro de los objetivos del estudio es utilizar este algoritmo para el cálculo de las proyecciones de sombra sobre los elementos del edificio y tener en cuenta éste efecto en el cálculo de la energía transferida a los locales debida a la radiación solar.

### **1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

En el presente documento se pretende describir el trabajo elaborado a lo largo de estos años en el departamento para completar la trayectoria del programa de doctorado.

El documento de esta tesis está estructurado en diez capítulos que a continuación se describirán brevemente y que intentan sintetizar una serie de fases y conocimientos que resultan necesarios y por las que ha pasado el proyecto para su elaboración.

En primer lugar, en el **segundo capítulo** se comentan los distintos métodos utilizados por los programas de simulación térmica de edificios más conocidos para el cálculo de sombras en los edificios. Es una revisión del estado del arte en la materia, en el que se comentan los algoritmos utilizados y tratamiento de la radiación de los mismos.

El **tercer capítulo** trata de describir el funcionamiento del método de los volúmenes de sombra (Shadow Volumes), así como el algoritmo de la partición binaria del espacio (Binary Space Partition) en computación. La segunda parte del mismo describe el modo de implementar el mismo en un entorno CAD. El capítulo describe el proceso seguido para la implementación del método.

El **cuarto capítulo** describe el procedimiento que se ha adoptado para la definición de la escena de polígonos y el posterior cálculo de las fracciones de cada cerramiento y hueco expuestas al sol. Así como la introducción de estos datos sobre el archivo dxf que describe el edificio.

El **quinto capítulo** comenta el concepto de interoperabilidad entre aplicaciones, así como los distintos formatos de archivos existentes hasta la fecha para dicho fin. Al final del capítulo se nombra el formato dxf como uno de los formatos de interoperabilidad. En el siguiente capítulo, el **capítulo sexto**, se describe este tipo de archivo y el modo en que se ha manejado para intercambiar datos entre la aplicación gráfica AutoCAD y la aplicación de simulación térmica vpCLIMA.

El **séptimo capítulo** explica la estructura modular del programa vpCLIMA que se ha desarrollado en programación por objetos y el esquema de funcionamiento de la misma.

El **octavo capítulo** describe el procedimiento teórico de cálculo de cargas térmicas del programa, se trata del método de funciones de respuesta. En él se describe el método de cálculo de cargas para los elementos que forman la envolvente térmica con el exterior, cerramientos exteriores y huecos.

El **noveno capítulo** compara los resultados obtenidos del cálculo de sombras con los resultados del programa EnergyPlus, mediante su “interface” DesignBuilder. En él se recogen los resultados obtenidos para distintas situaciones de una escena modelo.

El **décimo capítulo** recoge las conclusiones del estudio realizado y plantea una serie de trabajos futuros en la línea de la tesis que se presenta.

## **2. TRATAMIENTO DE LAS SOMBRAS EN LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN TÉRMICA**

El cálculo de las sombras en los programas de simulación térmica tiene el objetivo de determinar la radiación solar incidente sobre los distintos elementos que forman el edificio. El objeto de estudio –ventana, pared exterior,...- se le conoce como objeto receptor, mientras que el objeto que causa la sombra se le conoce como objeto ocluidor.

Para el cálculo de sombras de un edificio es necesario definir la escena de estudio de manera tridimensional. Es imprescindible conocer la geometría y la posición de los elementos que forman el objeto, así como de los elementos que forman el entorno del mismo. Estos elementos son estáticos, es decir, mantienen la misma posición a lo largo del año, pero en la escena hay que definir también la localización del sol, que será distinta para cada instante.

Los algoritmos de sombra consideran los polígonos como planos, con aristas rectas tanto los objetos receptores como los objetos ocluidores. En el caso de existir polígonos tridimensionales sólidos, superficies curvas y demás objetos singulares, éstos se aproximan con polígonos rectos para su posterior análisis.

Para el cálculo de la radiación solar incidente sobre el edificio no solamente es necesario conocer la posición del sol y de los objetos de la escena, también es necesario conocer el valor de la intensidad de radiación directa, de radiación difusa y de la reflejada.

El cálculo de las sombras generadas puede realizarse aplicando principios de geometría analítica (sombras proyectadas, transformación de coordenadas) ó mediante métodos de geometría computacional (intersección de polígonos). Para el segundo caso, los resultados obtenidos son función del método computacional utilizado.

Los resultados de los cálculos pueden obtenerse de distintas maneras, según el modelo utilizado, la salida de resultados puede ser el área soleada del objeto, el área sombreada, el ratio de sombra o de sol del objeto, la radiación total sobre la superficie teniendo en cuenta la sombra sobre la misma ó el ratio entre la existente y la que existiría en el caso de no contabilizar la sombra.

En el caso del algoritmo Shadow Volumes que se describe en este estudio, el resultado de los cálculos de sombreado es la representación del polígono de sombra sobre el objeto receptor, así como el ratio entre la superficie soleada y la superficie total del objeto. Obtener en los resultados la forma del polígono que representa la sombra es una ventaja en el proceso de diseño del edificio, ya que permite al profesional estudiar la forma que tiene la oclusión sobre el edificio de una manera visual y poder optimizarla en las fases iniciales. Este caso puede aplicarse en las ventanas, se puede observar el efecto que tiene la forma del edificio y la orientación del mismo sobre la sombra en las mismas para poder modificarla según sea pertinente.

Hay que tener en cuenta que para poder obtener datos referentes a la forma de los polígonos de sombra es necesario previamente crear una escena con los elementos

que representen la forma del edificio y de su entorno, lo cual no es posible en algunos programas de simulación térmica y tampoco resulta sencillo en la mayoría de los posibles.

Existen dos metodologías de cálculo según el software utilizado, algunos se centran en cálculos de elementos específicos como son las ventanas, y estudian el efecto que tienen los salientes colocados a las mismas sin tener en cuenta el efecto de sombra que se produce sobre los demás elementos del edificio. Otros programas son más sofisticados y estudian el efecto sombra que producen todos los elementos de la escena sobre cualquier elemento del edificio. Esta metodología más general va a ser la que se va a emplear en este estudio, ya que se van a tener en cuenta cualquier elemento que produzca sombra sobre las paredes exteriores, tejados y ventanas del edificio.

## **2.1. ALGORITMOS DE CÁLCULO DE SOMBRAS EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN TÉRMICA**

A continuación se comentan algunos de los métodos utilizados por los distintos programas de simulación para el cálculo de sombras sobre el edificio con especial interés sobre los aspectos más interesantes de los mismos: características de los objetos de la escena, representación del sol, salida de datos, precisión de los resultados y velocidad de procesado.

### **2.1.1. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS EN FORMA DE MALLA CUADRICULADA**

El algoritmo fue presentado por Groth y Lokmanhekim en el año 1969. Este método se empleó en los primeros programas de simulación energética de edificios:

- USPOD, creado por M. Lokmanhekim para el Servicio Postal de EEUU a principios de los años 70.
- NECAP (NASA Energy-Cost Analysis Program), desarrollado por Henninger en 1975 para la NASA.
- NBSLD (National Bureau of Standards Load Determination), desarrollado por Kusuda en 1974

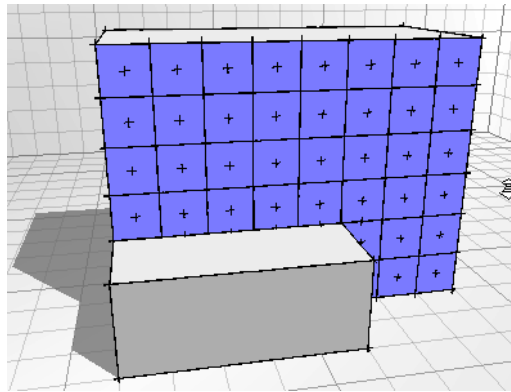
Estos programas fueron los precursores de otros más conocidos como el DOE-2, BLAST, TWOZONE, TARP ó CIRA.

A continuación se comentan los pasos principales que tiene el algoritmo:

- El problema se reduce del espacio de tres dimensiones a un plano de dos dimensiones (el de la superficie receptora de sombra) por transformación de coordenadas y proyección de sombras sobre dicha superficie.
- Para evitar la aparición de sombras falsas, la proyección de éstas que están detrás del horizonte aparente del plano de la superficie receptora se eliminan.

- La superficie receptora se divide en una malla bidimensional, cada uno de los elementos se representa por el punto central de la misma.
- Cada uno de estos puntos es testeado para comprobar si está dentro de la proyección de la sombra o no.
- La suma de los elementos que se encuentran dentro de la proyección de la sombra determina la fracción de sombra de la superficie.

El programa ESP-r continua utilizando esta metodología para el cálculo de las sombras sobre las superficies. El algoritmo divide la superficie a estudiar normalmente en una malla de 20x20 y analiza si existe alguna obstrucción entre la posición solar y el punto central de cada elemento de la malla. El valor de la fracción sombreada de la superficie es la suma de los elementos de la malla que quedan en la parte interior de la proyección de sombra del sol.

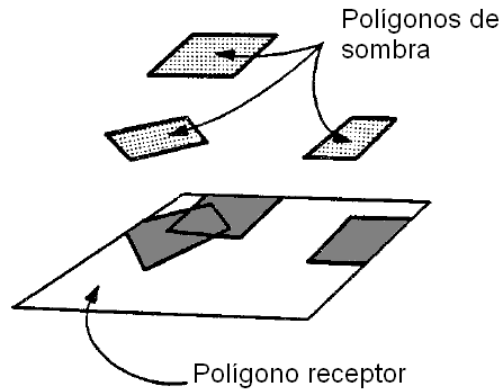


**Figura 1: La superficie de análisis mallada en 8x6 elementos.**  
Fuente: <http://naturalfrequency.com/articles/shadingcalculations>

El programa calcula el valor de la fracción sombreada cada hora para un día representativo de cada mes. Este valor lo guarda en el archivo de insolación de la zona. Una de las ventajas de esta metodología es que la insolación de las zonas puede calcularse independientemente de la geometría que estas tengan (cóncava, convexa, con cualquier orientación de superficie, etc.).

### **2.1.2. MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS EN FORMA DE BARRAS**

El método de barras es una mejora del algoritmo anterior de Groth y Lokmanhekim, y es el que utiliza actualmente el programa DOE-2. En este, la malla del método anterior se sustituye por la división del polígono en barras, lo cual aumenta la velocidad y la precisión del método.



**Figura 2: Escena con tres polígonos ocluidores y un polígono receptor de las sombras.**

El resultado final del algoritmo es la obtención de 24 ratios de sombra para un día de cada mes, en total 288 valores para cada uno de los polígonos receptores de sombra. El ratio se define de la siguiente manera:

$$Ratio\_sombra = \frac{Radiación\_solar\_directa\_con\_sombbras}{Radiación\_solar\_directa\_sin\_sombbras}$$

Se considera, por tanto que estos ratios son constantes para la misma hora durante todos los días del mes.

A continuación se explican los pasos que tiene el método:

- Transformación de coordenadas desde el sistema de coordenadas del edificio hacia el sistema de coordenadas principal.

En primer lugar se define un nuevo sistema de coordenadas el cual se conoce como sistema de coordenadas principal. La particularidad de este nuevo sistema de coordenadas es que los nuevos ejes  $x$  e  $y$  coinciden en el plano del polígono receptor de sombra.

Para transformar los puntos desde el sistema de coordenadas del edificio hasta el sistema de coordenadas principal se utiliza una matriz de transformación de la forma:

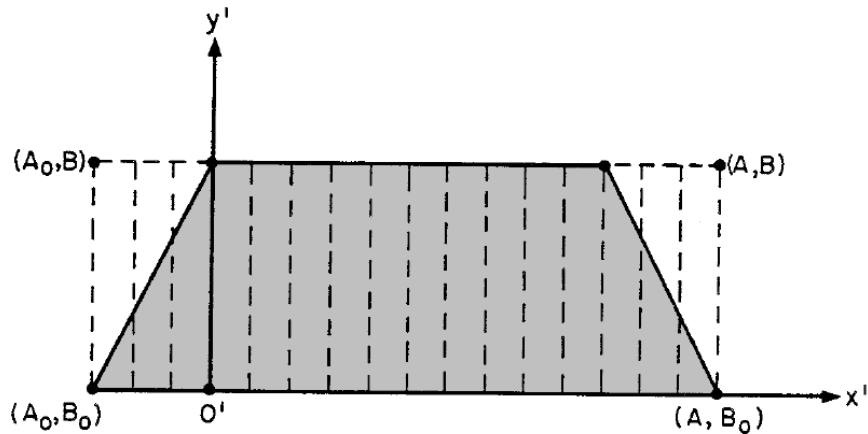
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 1**

Donde las coordenadas  $x', y', z'$  representan los puntos en el nuevo sistema de coordenadas principal y las coordenadas  $x, y, z$  pertenecen a las coordenadas del sistema del edificio. La transformación anterior tiene dos partes diferenciadas, los elementos de la matriz  $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{31}, A_{32}, A_{33}$  representan una rotación de los ejes, mientras que las diferencias  $x-x_0, y-y_0, z-z_0$  representan una traslación en los ejes ya que los parámetros  $x_0, y_0, z_0$  representan el origen del sistema principal respecto al sistema del edificio.

Los vértices de los polígonos oclusores son trasladados desde el sistema de coordenadas del edificio al sistema de coordenadas principal, de manera que los polígonos oclusores se proyectan sobre el plano del polígono receptor.

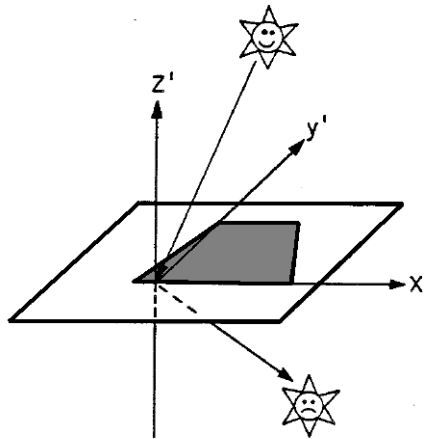
- La superficie receptora de la sombra queda integrada dentro de un rectángulo. Este rectángulo se divide en un número determinado de barras de igual anchura.



**Figura 3: Creación del espacio de trabajo para el polígono con un rectángulo sobrescrito y dividido en barras de igual anchura.**

- Se transforman los cosenos directores de la posición del sol desde el sistema de coordenadas del edificio al sistema principal.

En primer lugar se comprueba que la cara está orientada hacia el sol, para ello el valor de la coordenada  $z'$  de la posición del sol debe ser positivo, en caso contrario la superficie está de espaldas al sol y por tanto no se calcula la radiación directa sobre la misma.

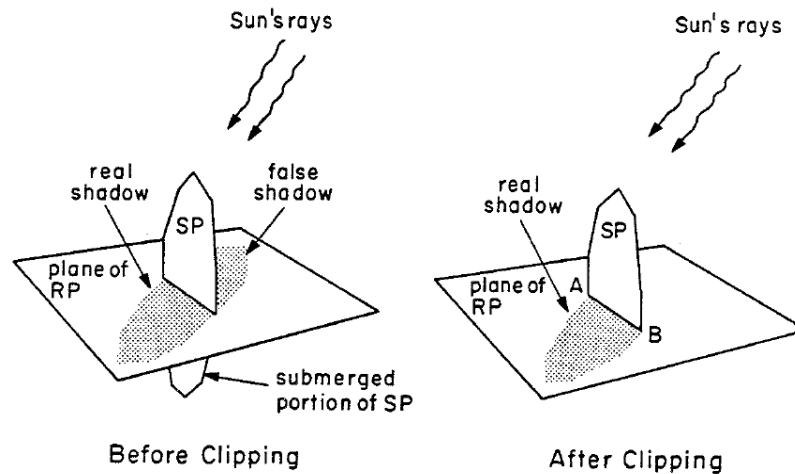


**Figura 4: Transformación de la posición del sol de un sistema de coordenadas a otro.**

- Transformación de los vértices de los polígonos oclusores al sistema de coordenadas principal.

En este punto hay que tener en cuenta que se crean polígonos de sombra falsos y hay que eliminarlos. Se trata de la transformación de los vértices de los polígonos oclusores que se encuentran detrás del plano del polígono receptor. Estos vértices hay

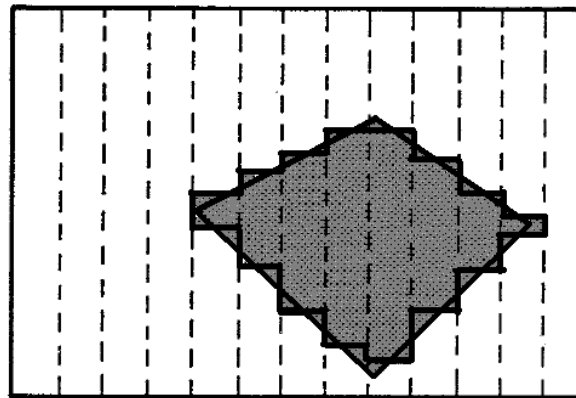
que eliminarlos ya que en la realidad la proyección no aparece sobre el polígono. En la siguiente figura se representa esta situación y la solución final de la misma.



**Figura 5: Transformación de los vértices de los polígonos ocluidores al sistema de referencia principal.**

- La forma de cada polígono de sombra sobre el polígono receptor se obtiene calculando y almacenando los puntos donde el polígono de sombra atraviesa la línea central de cada barra. Por tanto, cada polígono de sombras se aproxima por un grupo de barras.

El punto de cálculo de la proyección de la sombra sobre las barras es la línea central de las mismas, por tanto la sombra real se aproxima a una forma cuadrículada, tal y como se aprecia en la siguiente figura. La precisión del método está relacionada con la cantidad de barras en las que se divide el espacio de trabajo.



**Figura 6: Polígono dividido en barras y proyección de la sombra sobre las mismas.**

- Además del punto de cruce entre el polígono de sombra y la barra, también se almacena la intensidad de la radiación sobre cada una de las barras
- La cantidad de radiación solar directa sobre el polígono y la fracción de sombra se obtiene mediante los segmentos barras y las distintas intensidades almacenadas.



### **2.1.3. MÉTODO DE CÁLCULO DE POLÍGONOS CONVEXOS CON COORDENADAS HOMOGÉNEAS**

Este método es el que utiliza el programa BLAST, el programa TARP y el ENERGY PLUS. El método utiliza una transformación de coordenadas igual que el método anterior pero incorpora un algoritmo para cálculo de polígonos presentado por Walton en el año 1979, con la finalidad de mejorar el método existente de Groth y Lokmanhekim explicado anteriormente.

El algoritmo utiliza la misma técnica de transformación de coordenadas y cálculo de proyecciones, pero sustituye el análisis de elementos discretos por un método que utiliza coordenadas homogéneas.

En coordenadas homogéneas el espacio n-dimensional se representa por n+1 dimensiones, por ejemplo un punto en el espacio bidimensional (x,y) necesita tres coordenadas para ser representado (hx,hy,h), donde h es un número cualquiera. El uso de las coordenadas homogéneas se justifica porque simplifica el proceso de transformación de coordenadas (traslación, rotación y escalado) y el cálculo de intersecciones entre líneas.

En este método, la superficie de la sombra se calcula de manera exacta y no por aproximación como pasaba en los métodos anteriores. El cálculo del área soleada se hace de manera indirecta ya que se evalúa el contorno del polígono que representa la sombra, en el caso de existir varios polígonos oclusores el área final será la suma de cada uno pero teniendo en cuenta los solapes que existan y también se evalúa el contorno del polígono receptor frente al polígono de sombra.

Existe una diferencia entre el modo de tratar los polígonos en el método anterior y el actual. En el algoritmo de Walton los polígonos se almacenan como un listado ordenado de vértices, teniendo en cuenta que el polígono sea convexo (todos sus ángulos menores de 180°). Según el autor el método es más rápido que los anteriores y se pueden incorporar sombras de superficies semitransparentes como en el anterior.

Los pasos de los que consta el procedimiento son los siguientes:

- Las coordenadas cartesianas son transformadas en coordenadas homogéneas.
- Cálculo de las intersecciones de unos polígonos con otros.
- El conjunto de vértices que forman la intersección del cálculo de polígonos es el contorno del mismo.
- Los vértices se pasan nuevamente a coordenadas cartesianas.
- Los vértices ordenados en sentido contrario a las agujas del reloj se procesan y se calcula el área total.
- Se repite el proceso para todos los polígonos de sombra que vayan apareciendo.

Después de realizar la transformación de coordenadas del polígono de sombras al plano del polígono receptor, el siguiente paso es determinar el área total que representa la sombra respecto al área del polígono que representa la superficie. El método necesita que los polígonos sean convexos, con lo que el resultado del proceso generará otro polígono también convexo. En el caso en que existan polígonos no convexos, el proceso se puede realizar transformando éstos en convexos.

Las posiciones de los vértices de los polígonos convexos que forman la superposición se enumeran a continuación para el caso de dos polígonos convexos A y B:

- Los vértices del polígono A que se integran en B.
- Los vértices del polígono B que se integran en A.
- La intersección de ambos polígonos.

En la siguiente figura se aprecia resaltado el polígono común entre los polígonos A y B. se trata de la zona comprendida entre los vértices a-b-c-b. En este caso a es el vértice perteneciente al polígono B integrado en el polígono A, mientras que c es el vértice del polígono A perteneciente al polígono B. Por otro lado, los vértices b son las intersecciones entre los dos polígonos.

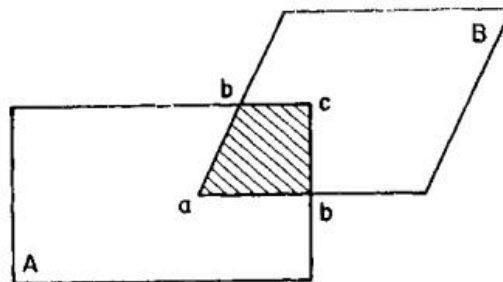


Figura 7: Superposición de los polígonos A y B.

A continuación se muestran posibles combinaciones de superposición entre dos polígonos, en la primera el polígono B queda insertado dentro del polígono A, las siguientes combinaciones son más complejas ya que los polígonos sobresalen por varias partes.

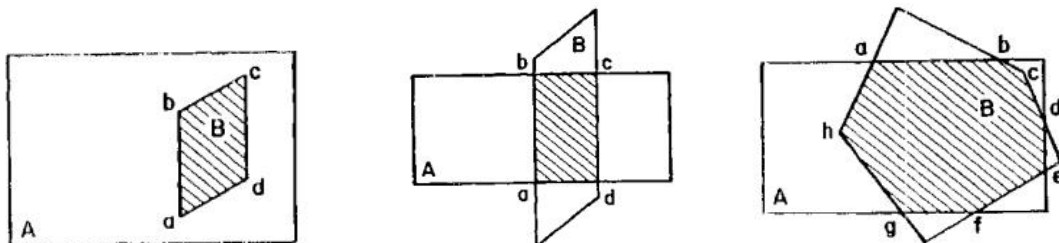
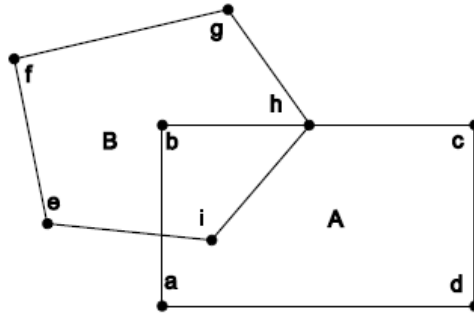


Figura 8: Distintas combinaciones de posiciones entre los polígonos A y B.

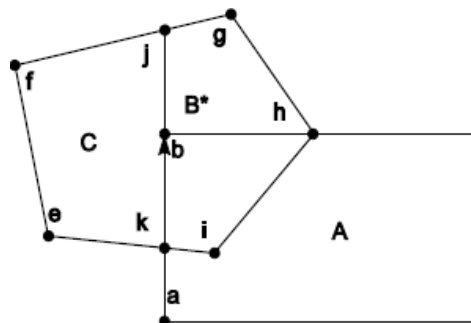
El algoritmo creado por Walton para el cálculo de la superposición entre polígonos se describe a continuación en una figura de ejemplo. El ejemplo está compuesto por dos polígonos A y B en los que aparece una superposición. El objetivo del algoritmo es determinar el polígono que forma dicha superposición. Como se observa en la figura ambos polígonos se definen en sentido contrario a las agujas del reloj.



**Figura 9: Superposición de los polígonos A y B.**

El método consiste básicamente en recorrer las distintas aristas de uno de los polígonos, observar si atraviesa el polígono conjunto y detectar el punto de intersección en caso afirmativo. Continuando con el ejemplo de la figura se procede a procesar la arista a-b del polígono A.

Sobre el plano donde están los dos polígonos se traza una línea con la dirección de la arista a-b. La línea separa el plano en dos partes y se observa la posición que tienen los vértices del polígono B respecto a la división recién creada. En la siguiente figura se observa que la línea extendida de a-b posiciona los vértices “e” y “f” a un lado de la misma, mientras que “g”, “h” e “i” se sitúan en la contraria. Esta situación indica que entre el vértice “f” y el “g” existe una intersección de la línea, la cual se indica con el nombre “j”. De la misma manera, los vértices “i” y “e” están en posiciones distintas, por lo que entre esta arista y la línea también existe una intersección, llamada “k” en la figura.



**Figura 10: Intersección de la arista a-b del polígono A con la e-i del polígono B.**

El polígono inicial B queda dividido por tanto con estos dos nuevos vértices en dos polígonos, señalados como C y B\*. El polígono C está formado por los vértices e-f-j-k y quede fuera del proceso porque ya por su situación no puede crear ninguna superposición con el polígono A.

El proceso continúa con el procesado de la arista b-c del polígono A frente a los vértices del polígono B\*, que son j-g-h-i-k. La nueva arista crea una nueva línea divisoria sobre el plano de trabajo que divide los vértices de B\* en dos grupos, en este caso existe

un solo punto de intersección y coincide con el vértice “h”, por lo que el proceso resulta más sencillo. El primer grupo de vértices lo forman b-j-g-h y pasan a ser el polígono D, mientras que el otro grupo es el formado por h-i-k-b y pasa a renombrar el nuevo polígono B\* ya que es el que continúa con el proceso de cálculo.

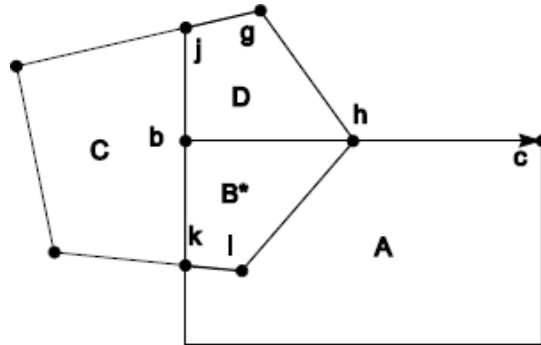


Figura 11: Procesado de la arista b-c del polígono A.

Para finalizar se procede al procesamiento de las aristas c-d y e-a como muestra la siguiente figura. Este último paso no aporta ninguna división nueva del polígono B\*, por lo que finalmente el polígono formado por los vértices b-h-i-k es el que forma la superposición de uno sobre otro. En la siguiente figura se señala con el nombre de E.

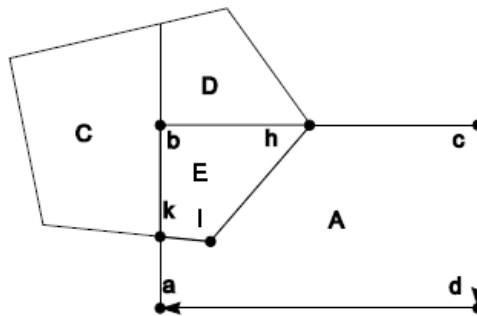


Figura 12: procesamiento de las dos aristas restantes del polígono A.

Cuando se corta el polígono en dos partes, como pasaba con la arista a-b del polígono A y el polígono B, cada nuevo polígono formado con esta partición de B no puede tener nunca más vértices que el polígono B original. Esta propiedad se debe a que los polígonos son convexos. Los nuevos polígonos formados son almacenados para el posterior cálculo de la superficie.

Una vez conocidos los vértices que forman el polígono final  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  se calcula la superficie del mismo, para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$Area = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=0}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$

**Ecuación 2**

El valor del área es positivo si el orden de los vértices es en sentido antihorario, mientras que en sentido horario se obtienen valores negativos del área.

#### 2.1.4. MÉTODO DE CÁLCULO DE POLÍGONOS CÓNCAVOS EVALUANDO SU CONTORNO

El siguiente método se utiliza en el programa XSUN y fue adaptada al mismo por K. Grau y K. Johnsen en el año 1995. El origen del método está basado en una técnica desarrollada para aplicaciones gráficas descrita por Weiler y Atherton. El método es más complejo que el anterior pero consigue una gran precisión y es bastante rápido.

Los polígonos, al igual que en el método anterior se almacenan por una serie de vértices ordenados adecuadamente. La aplicación del método necesita igual que el anterior, la reducción del espacio tridimensional al espacio bidimensional por transformación de coordenadas y proyección.

El proceso para el cálculo del solapamiento entre dos polígonos se describe a continuación, partiendo de una escena con dos polígonos. Los polígonos se consideran como una lista de vértices. Los vértices del polígono receptor tienen los nombres en letras minúsculas, mientras que los vértices del polígono ocluidor las tienen en mayúsculas. El polígono receptor tiene la lista de vértices inicial: a-b-c-d, mientras que el polígono ocluidor tiene la lista inicial: A-B-C.

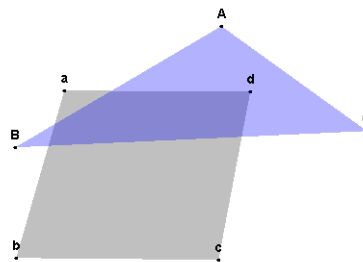


Figura 13: Polígonos de la escena inicial.

El primer paso del proceso es encontrar todas las intersecciones entre los dos polígonos de la escena. Para ello comparamos cada una de las aristas de los polígonos entre sí. La primera comparación es entre la arista A-B del polígono ocluidor y la arista a-b del polígono receptor. Como se aprecia en la figura aparece un punto de intersección llamado "1".

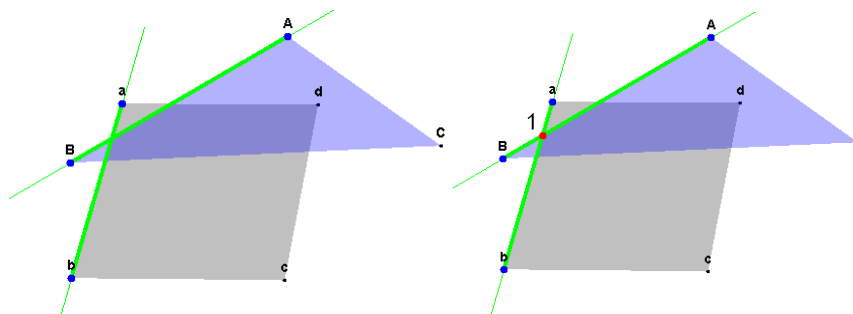
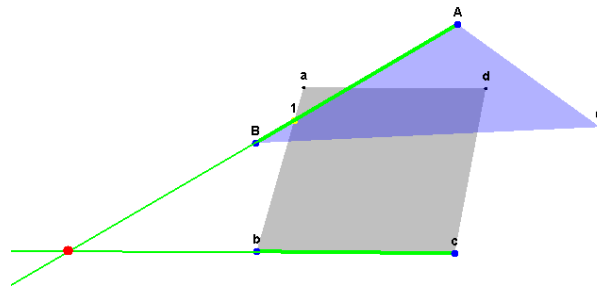


Figura 14: Primera comparación entre aristas de polígonos.

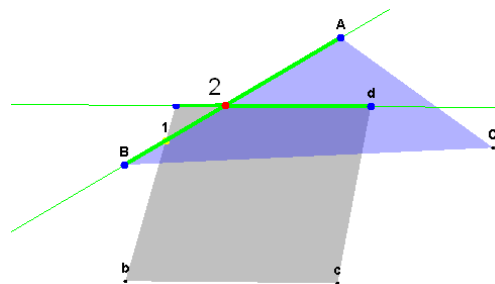
El primer punto de intersección se añade a la lista de vértices que forman los polígonos, ya que es común a ambos. La nueva lista de vértices del polígono receptor es ahora a-1-b-c-d, mientras que la nueva lista de vértices del polígono ocluidor es: A-1-B-C. El proceso continúa con el cálculo de la intersección entre las aristas A-B del

polígono oclisor con b-c del polígono receptor, cuyo resultado es un punto de intersección que se sitúa fuera de los polígonos de la escena, por lo que el nuevo punto de intersección no forma parte de la lista de polígonos.



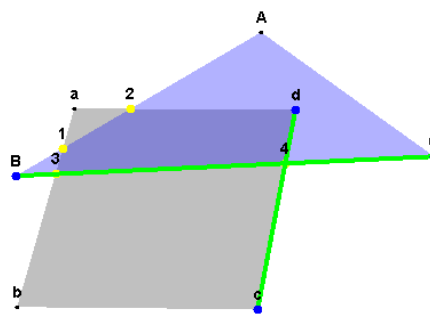
**Figura 15: Intersección de las aristas A-B del polígono oclisor con b-c del polígono receptor.**

El proceso se repite de manera recursiva comparando todas las aristas de un polígono con las del otro y añadiendo o no los nuevos puntos de intersección en los listados de vértices de los polígonos en los casos en que proceda. El siguiente proceso de comparación entre aristas en el que se incluye un nuevo punto de intersección es el de la comparación de A-B con la arista d-a, cuya intersección lleva el nombre de 2.



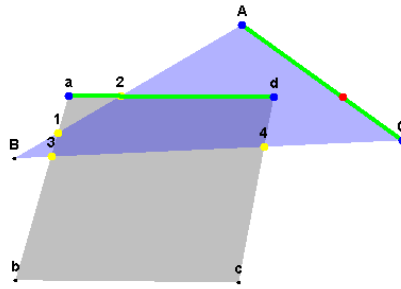
**Figura 16: Intersección aristas A-B con d-a.**

El proceso continúa con la comparación de las aristas a-b, b-c, c-d y d-a con la arista B-C del polígono oclisor. Esta comparativa crea dos puntos de intersección nuevos llamados 3 y 4 los cuales se representan en la siguiente figura.



**Figura 17: Comparativa de las aristas del polígono receptor frente a la arista B-C del polígono oclisor.**

Finalmente termina el proceso de comparación con el cálculo de las intersecciones de las aristas del polígono receptor frente a la arista C-A del oclisor. Lo cual no añade ninguna intersección nueva en la escena.

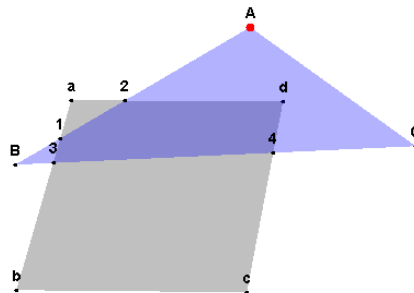


**Figura 18: Comparativa de las aristas frente a la arista C-A.**

Los dos listados de vértices quedan finalmente de la siguiente manera:

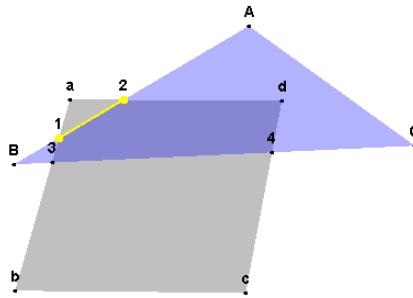
- Polígono ocluidor: A-2-1-B-3-4-C
- Polígono receptor: a-1-3-b-c-4-d-2

Aquí termina la fase de cálculo de intersecciones del método, el siguiente proceso del método es comprobar la ubicación de los distintos puntos para localizar el solape. El polígono que forma la zona de solape entre los dos polígonos se define con una combinación de los vértices ya calculados. Para encontrar el listado de vértices que forman la oclusión se realiza un proceso de comprobación como el que se describe a continuación. El proceso de comprobación de vértices sigue un orden complejo ya que el proceso empieza con la comprobación del listado de vértices del polígono ocluidor y a medida que aparecen vértices que representen una intersección la comprobación de vértices sigue en el listado de vértices del polígono contrario. Continuando con el ejemplo se procede a la fase de creación de listado de vértices del polígono de solapamiento.



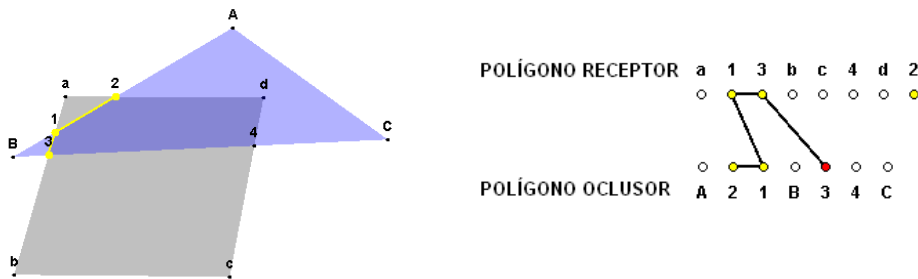
**Figura 19: Inicio de la fase de comprobación del listado de vértices del polígono ocluidor.**

El proceso de comprobación empieza por el primer vértice de la lista del polígono ocluidor (vértice A). El punto A se encuentra fuera del polígono receptor, por tanto no forma parte de la oclusión y el proceso de comprobación continúa con el vértice siguiente de la lista del polígono receptor, que es el vértice 2. El vértice 2 es una “intersección de entrada”. En el proceso descrito por Weiler y Atherton se define como “intersección de entrada” (“inbound intersection”) como cualquier vértice de intersección calculado anteriormente que en el proceso que se sigue de comprobación represente un punto de entrada al polígono receptor. Este es el caso del vértice 2 ya que el anterior vértice de la lista (vértice A) se encontraba fuera del polígono receptor y el segmento que constituye a partir de 2 hasta el siguiente punto es un segmento interior en el polígono receptor. La figura siguiente representa esta situación.



**Figura 20: Representación del segmento 2-1 perteneciente a la secuencia de comprobación e inicio del listado del nuevo polígono.**

El vértice 2 es el primer vértice que se incluye a la lista de vértices que definirán el polígono de intersección entre ocluidor y receptor. La comprobación sigue con el siguiente punto de la lista del polígono ocluidor, punto 1, el cual también pertenece al listado del nuevo polígono. Pero en este caso, el nuevo vértice (punto 1) representa una intersección de los dos polígonos. Cuando se llega a una intersección, el siguiente punto a comprobar es el que continúa a partir de este vértice en la lista del otro polígono, es decir, del polígono receptor. El siguiente punto es el punto 3. La siguiente figura muestra un esquema del proceso seguido.



**Figura 21: La figura superior muestra el listado de vértices que van conformando la intersección. La figura inferior muestra el listado de vértices de del polígono ocluidor y receptor y el orden de comprobación seguido.**

Al tratarse el punto 3 de otra intersección, el proceso de comprobación de vértices continúa con el listado del polígono ocluidor nuevamente. El siguiente punto de comprobación según el esquema es el punto 4, el cual, al tratarse nuevamente de otra intersección el proceso continuará con la lista contraria. Después del punto 4 en la lista del polígono receptor se encuentran los vértices “d” y 2. El vértice 2 es el vértice inicial del nuevo listado por lo que representa el cierre del nuevo polígono calculado. Por tanto el listado de vértices que forman el polígono de intersección son: 2-1-3-4-d.



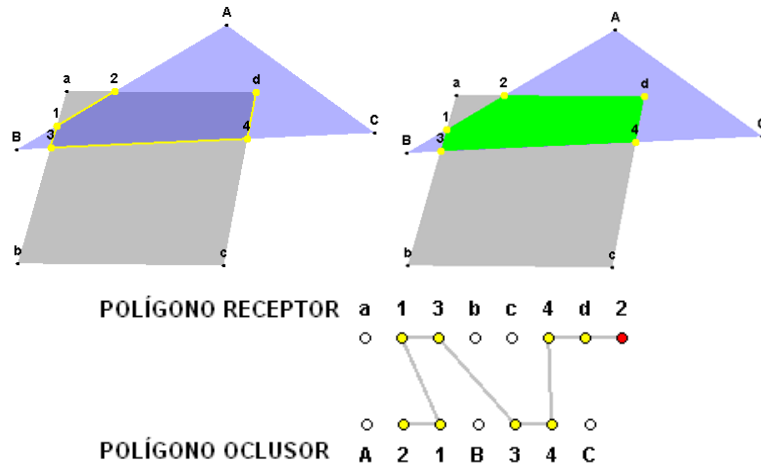


Figura 22: Representación del polígono final calculado y de la secuencia de vértices del cálculo.

### 2.1.5. SHADOW MASKS

Otro método que existe para el cálculo de sombras y de radiación sobre un punto determinado es el método conocido como “shadow masks”. El método consiste en realizar un estudio punto a punto de la superficie a estudiar, igual que los métodos que hemos descrito anteriormente, y generar un mapa estereográfico del punto, dibujando los elementos que hacen sombra, para saber la cantidad de energía que llega al punto en un momento determinado.

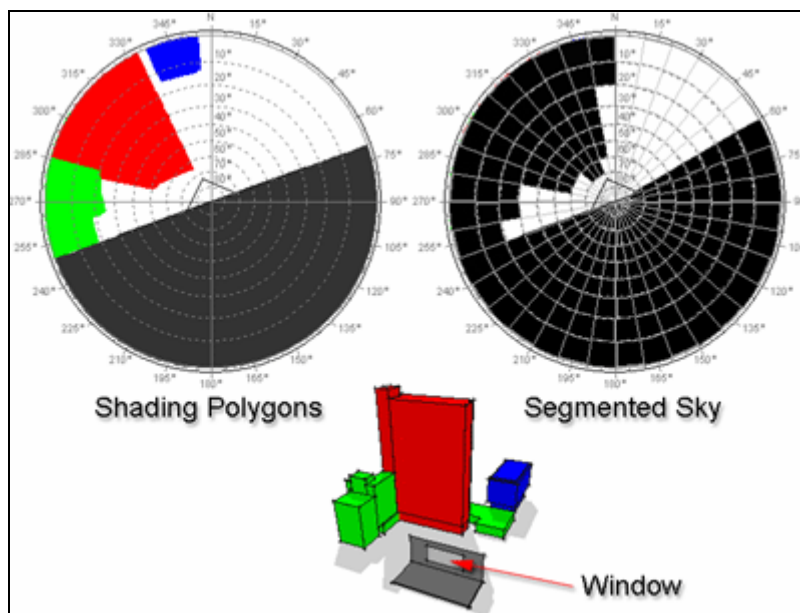
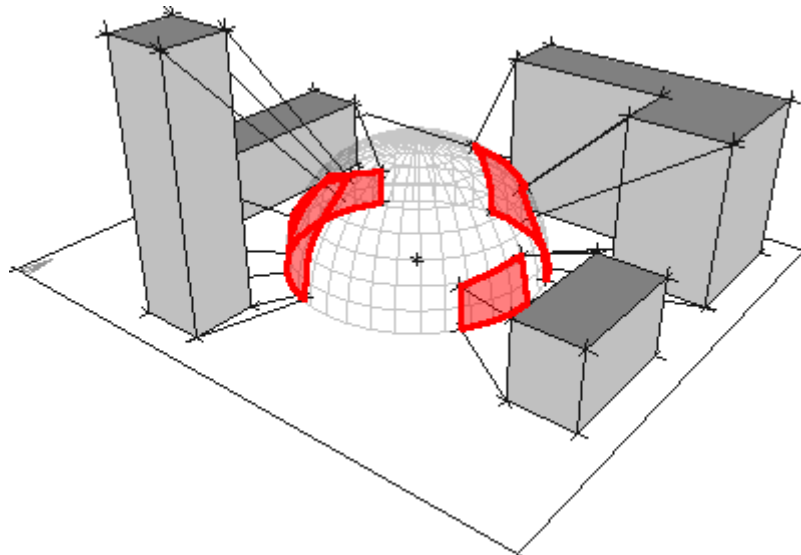


Figura 23: Mapa estereográfico representativo de la escena que se observa  
[http://squ1.org/wiki/Shading\\_Mask\\_Calculations](http://squ1.org/wiki/Shading_Mask_Calculations)

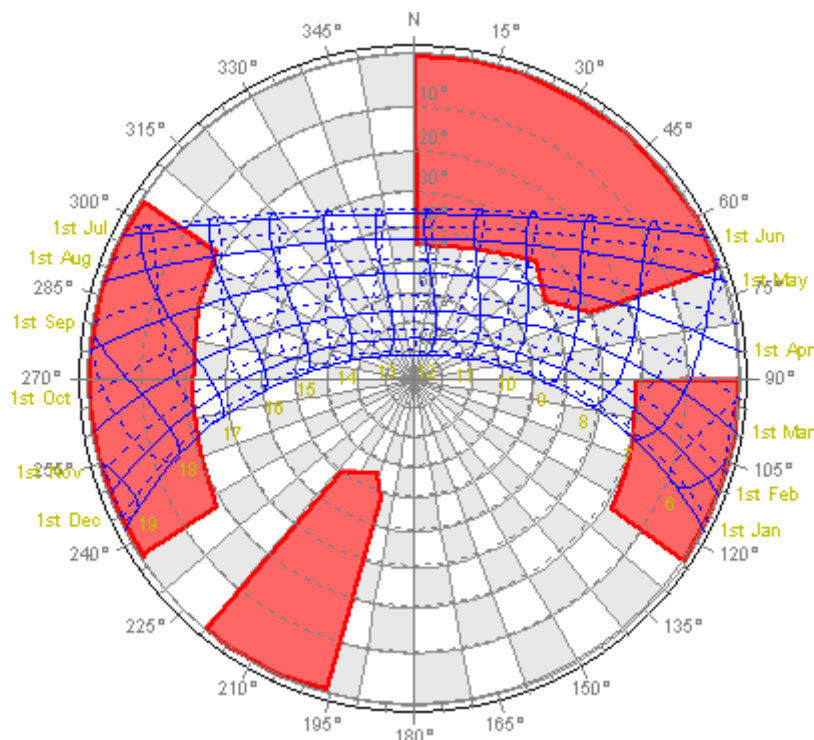
A continuación se muestra una escena y la proyección que tienen los edificios del contorno sobre el mapa estereográfico del punto central de la escena.



**Figura 24: Escena con la bóveda que representa el mapa estereográfico con las proyecciones de los edificios del entorno.**

[http://squ1.org/wiki/Shading\\_Mask\\_Calculations](http://squ1.org/wiki/Shading_Mask_Calculations)

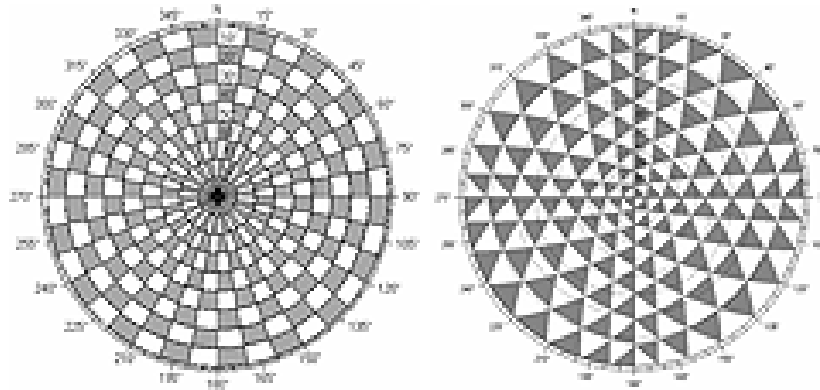
La representación del mapa estereográfico es la siguiente, en la que se aprecia el perfil de los edificios y la trayectoria solar.



**Figura 25: Representación del mapa estereográfico**

[http://squ1.org/wiki/Shading\\_Mask\\_Calculations](http://squ1.org/wiki/Shading_Mask_Calculations)

Este método suele emplearse más para el cálculo de la energía total incidente en un punto. Para ello, se divide la bóveda que se observa en el mapa en sectores y se le asigna a cada sector un peso en las pérdidas energéticas del punto superficial.



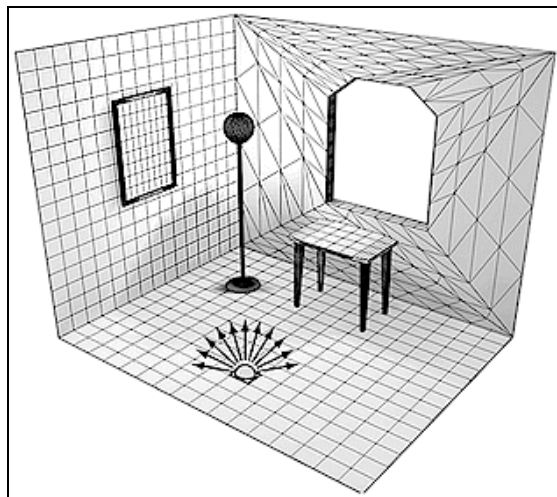
**Figura 26: Distintos tipos de subdivisiones del mapa estereográfico.**  
[http://squ1.org/wiki/Shading\\_Mask\\_Calculations](http://squ1.org/wiki/Shading_Mask_Calculations)

Con este método es posible también calcular los factores de forma entre la superficie de estudio y el resto de elementos de la escena, superficies y cielo.

### 2.1.6. BACKWAY RAY TRACING

Sánchez de la Flor explica también en el artículo referenciado en la bibliografía (Ref. 6) un método de cálculo de la radiación incidente sobre el edificio de una forma parecida a la anterior, aunque el método que describe lo llama “Backward Ray Tracing”, y es muy similar al método conocido como “Radiosity”.

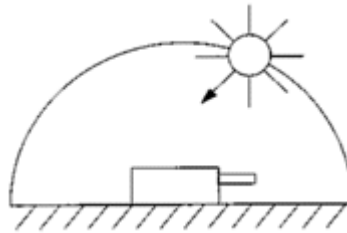
El método consiste en dividir la superficie que se quiere estudiar en pequeñas porciones, para cada una de las cuales se calculará el valor de la radiación sobre la misma.



**Figura 27: Método de la radiosidad.**

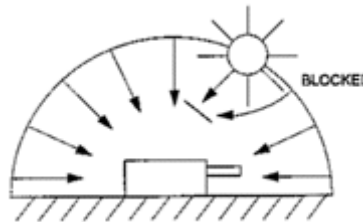
El trazado de los rayos, en lugar de ser desde un punto de vista del observador, como pasa en el Ray Tracing aplicado a los programas de renderizado de imagen, es desde cada una de las divisiones de la superficie. Para obtener la radiación directa se traza un rayo desde el punto central de la división hacia la posición del sol en ese momento. En caso de que el rayo no se encuentre con ningún obstáculo en el camino, entonces la división de superficie en cuestión se encuentra iluminada (no esta en

sombra) y se calcula el valor de la radiación incidente multiplicando ésta por el coseno del ángulo de la misma y la altura solar.



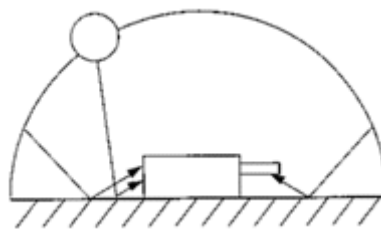
**Figura 28: Radiación directa.**

El resto de radiación se supone difusa y para el cálculo de la misma se trazan una serie de rayos desde la división de la superficie en cuestión hacia todos los lados. De ahí se obtiene la cantidad de rayos que interceptan el cielo y la cantidad que chocan sobre superficies de alrededor, calculando así la componente difusa de la radiación que proviene del cielo y el factor de forma entre el elemento diferencial de superficie y el cielo.



**Figura 29: Radiación difusa.**

Del mismo modo se calcula la radiación difusa debido a la reflectividad de los edificios del alrededor. Cuando el rayo del caso anterior que choca con una superficie del contorno puede unirse desde el punto de la superficie con el punto de luz (sol), entonces hay que considerar que existe una componente de radiación (difusa reflejada) que debe añadirse al computo de energía incidente sobre la superficie.



**Figura 30: Radiación reflejada.**

Sánchez de la Flor describe el método en su tesis doctoral (Ref. 7) al hacer referencia a los modelos para el cálculo de la radiación directa primaria. El principal inconveniente del método descrito para el cálculo de la radiación directa primaria es, según el propio Sánchez de la Flor, la “laboriosidad” que supone para el ordenador los cálculos la implementación de ésta metodología para cada una de las superficies que forman el edificio. Con la finalidad de reducir los tiempos dedicados al cálculo de la radiación directa se propone un método de caracterización, de manera que se hacen los cálculos para unas posiciones solares determinadas y mediante interpolación se obtienen los datos restantes.

### **2.1.7. TRNSHD-APLICACIÓN PARA TRNSYS**

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation Program) es un programa de simulación térmica estructurado de forma modular. Esto quiere decir que la parte gráfica (“interface”), el motor de cálculo y las librerías de componentes componen partes separadas o módulos del sistema. Este modo de trabajar tiene la ventaja principal de poder ampliar cada una de las partes independientemente a las demás, con lo que se consigue un programa más flexible y abierto que permite mejorar.

En este sentido, TRNSYS da la posibilidad de aparición de nuevas aplicaciones que mejoren su funcionamiento, éste es el caso de TRNSHD, un programa que calcula las sombras y la radiación que penetra en el edificio y aporta estos datos para un cálculo con el motor de TRNSYS. Este programa permite mejorar el cálculo de sombras que el programa hacía con los módulos TYPE 34 y TYPE 56, ya que representa un método más general, no limitado a unas geometrías determinadas, de sombras.

El programa necesita una entrada de datos geométrica que represente el edificio, y permite realizar los cálculos de tres modos distintos:

- Las sombras de la radiación directa ON/OFF,
- La radiación difusa ON/OFF,
- La distribución interior de la radiación directa ON/OFF.

El programa calcula la posición del sol hora a hora para un día al mes durante los doce meses, y con ello calcula la sombra que generan los elementos arquitectónicos entre sí. La posición del sol en cada momento la determina por el módulo de TRNSYS llamado TYPE 16, el cual proporciona los ángulos cenital y acimutal.

De la radiación solar se determina la sombra y las superficies sobre las que incide la radiación solar directa que atraviesa los cerramientos semitransparentes.

Para el cálculo de la radiación difusa utiliza el mismo método que se ha descrito en el programa DOE-2. El método consiste en dividir la semiesfera de cielo en 12x6 partes, de forma que los incrementos de ángulo cenital sean de 15° y los incrementos de ángulo acimutal de 30°. De este modo, la radiación difusa del cielo se calcula uniendo el centro de cada una de las piezas con que se ha dividido el cielo con la superficie que se calcula. Si esta unión no tiene ningún obstáculo significa que la proporción de radiación difusa que representa ese segmento llegará a la superficie en cuestión.

### **2.2. INTEGRACIÓN DE LOS CÁLCULOS EN LOS PROGRAMAS**

En este apartado comentamos la manera en la que algunos programas de simulación adaptan las técnicas mencionadas anteriormente en sus aplicaciones. El cálculo de las sombras del edificio es un proceso que puede consumir mucho tiempo y mucha memoria en función de la complejidad que tenga la geometría de la escena y la cantidad de cálculos que haya que realizar. La mayoría de programas intentan mantener una precisión aceptable y disminuir en el proceso el tiempo requerido y los recursos del sistema.

### **2.2.1. NIVELES DE CÁLCULO**

Algunos programas permiten seleccionar al usuario distintos niveles de cálculos de sombra. En el edificio se diferencian dos tipos de elementos que producen sombras, uno son los dispositivos de sombreado adjuntos al edificio, como son los aleros o voladizos en las ventanas y otro tipo de elementos son los elementos cercanos del entorno del edificio y que no forman parte de él, como son los edificios colindantes o el terreno.

Cada programa determina el nivel de detalle de los cálculos de una manera distinta, el programa ESP-r requiere que el usuario especifique los objetos ocluidores, como es lógico, pero además también necesita que se indique sobre qué elementos se van a proyectar estas sombras. De manera que el usuario es el que identifica las superficies a considerar en el sombreado.

El DOE-2 en cambio, determina automáticamente las superficies receptoras de las sombras, pero no considera por defecto que las paredes exteriores del edificio se consideren como elementos ocluidores para las demás paredes. Ésta característica debe ser indicada por el usuario. Además el programa DOE-2 solamente permite superficies receptoras y superficies ocluidoras en forma de rectángulo.

Por otro lado, el programa BLAST considera por defecto que las paredes exteriores propias del edificio constituyen también elementos ocluidores frente a las demás superficies del mismo. El programa DOE-2 y el BLAST permiten el uso de superficies ocluidoras con cierto grado de transparencia, mientras que el programa ESP-r considera cualquier polígono ocluidor como un elemento opaco.

El programa ENERGY PLUS permite tres modalidades para el cálculo y tratamiento de los resultados sobre la zona. El usuario debe decidir una de las tres opciones entre: "Minimal shadowing", "Full exterior" y "Full interior and exterior". La primera opción solamente tiene en cuenta la sombra que producen los aleros y voladizos sobre las ventanas y puertas. Este es el caso más simple de cálculo, por tanto el más rápido. En la opción "Full exterior" el cálculo de las sombras se amplía para considerar también el efecto de sombra que producen los propios elementos del edificio por la geometría del mismo. Por tanto esta opción considera los cerramientos exteriores, paredes, techos y suelos, como elementos ocluidores de la escena. Esta opción considera que la radiación directa que penetra por puertas y ventanas va a parar por completo al suelo de la zona. La tercera opción, "Full interior and exterior", realiza el cálculo de sombreado igual que la anterior, pero además tiene en cuenta el efecto de la penetración de la radiación directa sobre los elementos interiores de la zona para su correcta distribución.

### **2.2.2. PERIODOS DE CÁLCULO**

La mayoría de programas reducen los periodos de cálculo del sombreado a un día característico de cada mes, para el que se calcula hora a hora el efecto de las sombras. En el caso del programa ESP-r este día corresponde a la media de la declinación solar del mes, mientras que para el programa DOE-2 se considera el primer día de éste. Los resultados obtenidos para el día característico se consideran constantes para todos los

días del mismo mes. Esta simplificación no produce una modificación de los resultados muy significativa y permite ahorrar una gran cantidad de tiempo y memoria en la simulación.

El programa ESP-r realiza el cálculo del sombreado antes de realizar el cálculo de la simulación energética. Los resultados del cálculo de sombras se almacenan en un archivo independiente, de manera que si no se modifica la geometría del mismo los resultados pueden utilizarse para distintas simulaciones. Además permite incorporar los resultados de nuevos elementos calculados previamente.

En el caso del programa DOE-2, los cálculos de sombreado se realizan al mismo tiempo que la simulación, por lo que no comparte las ventajas descritas en el programa anterior. El programa BLAST realiza el cálculo también antes de la simulación energética.

### 2.3. TRATAMIENTO DE LA RADIACIÓN DIFUSA

La radiación difusa es parte de la radiación total que incide sobre la superficie de la atmósfera y que se dispersa de su dirección original a causa de las moléculas que forman esta capa. La mayoría de programas de simulación térmica de edificios no tienen en cuenta el efecto de bloqueo que algunos obstáculos pueden ejercer sobre esta radiación, aunque otros, como el programa DOE-2 si lo contabiliza.

El modo más habitual de contabilizar este factor es considerar una fuente isotrópica y calcular los factores de forma entre la superficie receptora y el cielo. Este cálculo se complica cuando las superficies tienen configuraciones especiales o disponen de aleros, voladizos, etc. El programa DOE-2 representa el cielo como media esfera y la discretiza como de una malla cuadrículada se tratara. Se considera que cada cuadrícula emite la misma cantidad de radiación. Para conocer la cantidad total de radiación difusa que recibe un elemento se calcula el número de elementos de la malla que no están ocluidos por ningún otro elemento de la escena. El punto que se estudia en cada elemento de la cuadrícula es el punto central de la misma.

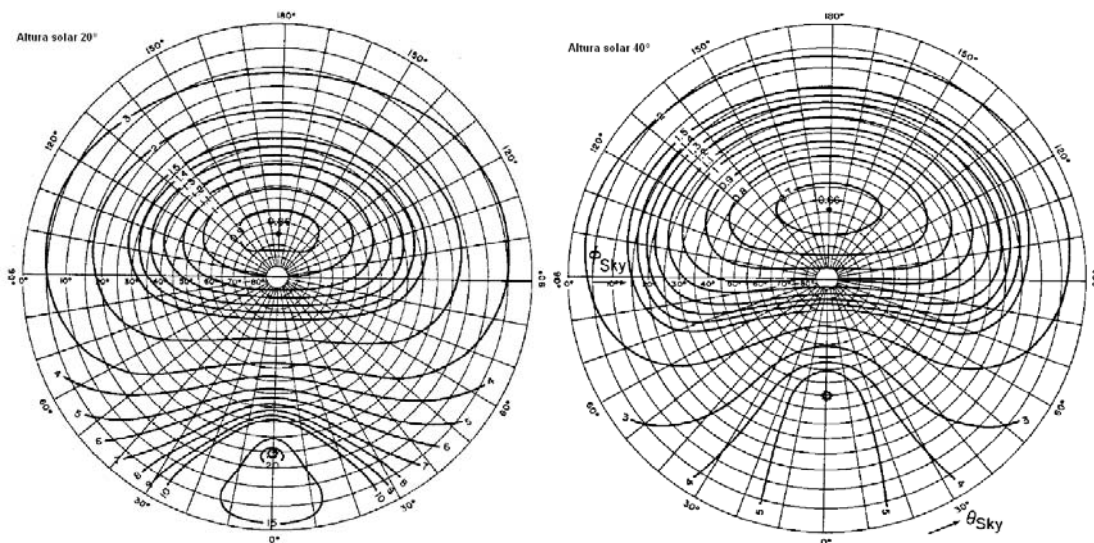
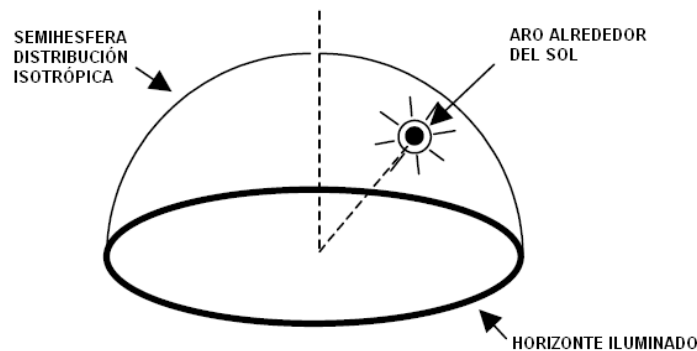


Figura 31: distribución de la luminancia en el cielo claro para las alturas solares de 20° y 40°.

El programa ENERGY PLUS tiene una metodología de cálculo de la radiación difusa más elaborada. El programa considera una distribución de la radiación en el cielo anisotrópica. Para realizar estas consideraciones el usuario debe indicarlo aplicando el valor de “1” a la variable “SkyRadianceDistribution”. La distribución de radiación difusa en el cielo que utiliza el programa está basada en un modelo empírico de radiación medida descrito por Pérez et al., 1990. En este modelo de radiación el cielo se divide en tres partes:

- Una semiesfera con una distribución de la radiación isotrópica
- Un aro de luz más iluminado alrededor de la posición del sol
- Un horizonte iluminado



**Figura 32: Distribución de radiación difusa descrita por Pérez et al., 1990.**

En el algoritmo del programa la cantidad de radiación difusa viene dado por la suma de cada uno de los tres elementos multiplicados cada uno por el factor de sombra de radiación difusa en cada uno.

$$I_{\text{cielo}} = R_{\text{horizontal}} \cdot I_{\text{horizontal}} + R_{\text{semiesfera}} \cdot I_{\text{semiesfera}} + R_{\text{arco}_solar} \cdot I_{\text{arco}_solar}$$

**Ecuación 3**

Para el caso de la radiación debida al cinturón que forma el horizonte, se calcula el ratio  $R_{\text{horizontal}}$  dividiendo la línea del horizonte en 24 intervalos de igual longitud, de manera que el valor del ratio se obtiene con la expresión:

$$R_{\text{horizontal}} = \frac{\text{Irradiancia}_{\text{del\_horizonte\_con\_obstáculos}}}{\text{Irradiancia}_{\text{del\_horizonte\_sin\_obstáculos}}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} I_i \cdot SF_i}{\sum_{i=1}^{24} I_i}$$

**Ecuación 4**

El factor  $SF_i$  representa la fracción soleada de la radiación en el intervalo  $i$ , y el factor  $I_i$  representa la radiación difusa que llega al intervalo  $i$  sin ningún tipo de oclusión.



Para el cálculo del sombreado sobre la semiesfera, se considera una malla de 144 puntos (6 en altitud y 24 en azimut) distribuidos uniformemente sobre la misma. Se define a continuación la expresión del ratio de la semiesfera teniendo en cuenta que  $I_{i,j}$  es la radiación del elemento (i,j) de la malla y que el  $SF_{i,j}$  la porción soleada de la misma.

$$R_{semiesfera} = \frac{\text{Irradiancia\_de\_la\_semiesfera\_con\_obstáculos}}{\text{Irradiancia\_de\_la\_semiesfera\_sin\_obstáculos}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^6 I_{i,j} \cdot SF_{i,j}}{\sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^6 I_{i,j}}$$

**Ecuación 5**

Como la región del aro solar está concentrada en la posición del sol, el ratio de la misma es el mismo que la fracción de la parte iluminada calculada para la radiación directa.

$$R_{semiesfera} = \frac{\text{Irradiancia\_del\_aro\_solar\_con\_obstáculos}}{\text{Irradiancia\_del\_aro\_solar\_sin\_obstáculos}} = SF_{sol}$$

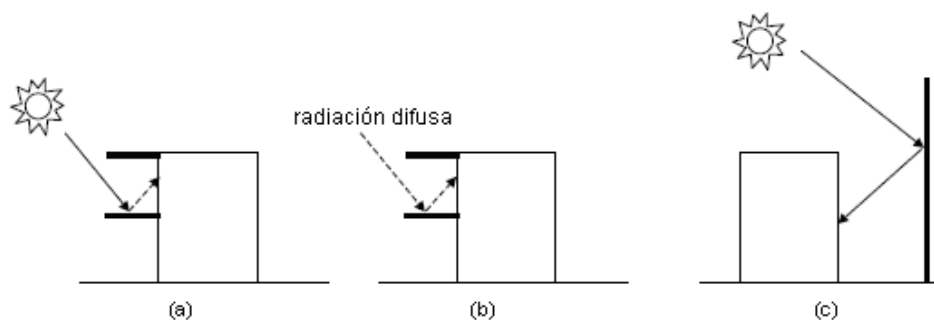
**Ecuación 6**

## 2.4. TRATAMIENTO DE LA RADIACIÓN REFLEJADA

La radiación reflejada es la que llega a través de los elementos del edificio habiendo sido reflejada por los objetos que forman el entorno del mismo. En la literatura se diferencian dos tipos de radiación reflejada, la reflejada pura y la especular. En el caso de la radiación reflejada pura, el método de cálculo puede ser igual que en la radiación difusa, se considera la fuente isotrópica y se calculan los factores de forma. En el caso de la radiación reflejada especular el problema es más complejo y pocos programas de simulación térmica incorporan este estudio. El programa ENERGY PLUS calcula este tipo de radiación, a continuación comentamos como lo hace.

El programa ENERGY PLUS analiza tres tipos de elementos que producen radiación reflejada:

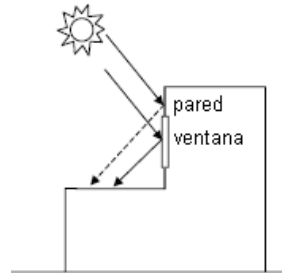
- Las superficies y elementos de sombra. Se trata de salientes de ventanas, voladizos, aleros, etc. o incluso edificios colindantes, los cuales aportan parte de radiación debido a la reflectancia de los materiales que los forman.



**Figura 33: Radiación reflejada en los elementos de sombra.**

En la figura anterior el primer caso indica la radiación reflejada de la radiación solar directa, la figura b indica la radiación reflejada de la radiación difusa procedente del cielo y la figura c muestra la radiación reflejada especular debida a la fachada de un edificio cercano con una gran cantidad de vidrio en la misma.

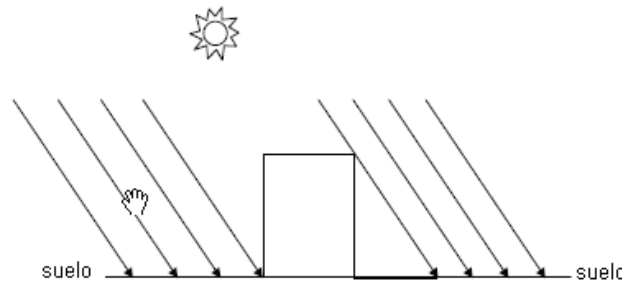
- Las propias superficies exteriores de los edificios. Según la configuración del edificio y del color de las paredes del mismo puede existir mayor o menor cantidad de radiación reflejada de unas superficies sobre otras.



**Figura 34: Radiación reflejada entre las superficies del propio edificio debido a la geometría del mismo.**

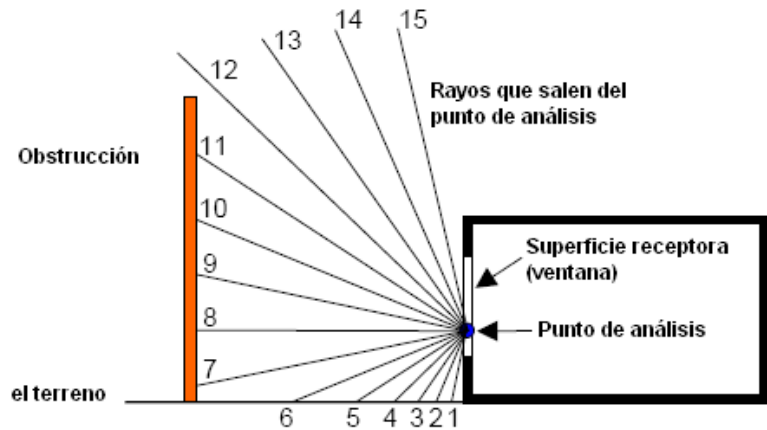
En este caso se considera que existe radiación difusa reflejada cuando se trata de superficies opacas, como paredes exteriores, mientras que se calcula una cantidad de radiación reflejada de tipo especular cuando aparecen puertas con vidrios y ventanas.

- La superficie del terreno. El programa tiene en cuenta este cálculo aunque no esté marcada la opción de cálculo de reflexiones. El cálculo de la radiación reflejada por el terreno considera que en él no existe ningún tipo de obstrucción como puedan ser las sombras del propio edificio. Las sombras se tienen en cuenta sólo cuando el usuario utiliza la opción del cálculo de reflexiones.



**Figura 35: Radiación que llega al terreno y posteriormente refleja.**

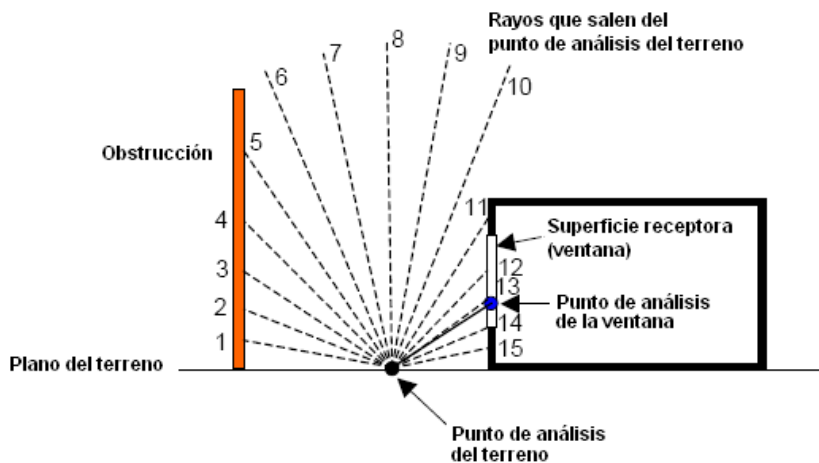
El método empleado para calcular la radiación reflejada es el ray-tracing. Este algoritmo consiste en generar una serie de rayos cuyo origen es un punto perteneciente a la superficie a estudiar y cuyas direcciones se apuntan a una semiesfera situada en el plano de la superficie. Posteriormente se analiza cada uno de los rayos lanzados para determinar cuál ha sido su objetivo: un obstáculo, el terreno o el cielo.



**Figura 36: Despliegue de rayos del método Ray-tracing aplicado a un punto de la ventana.**

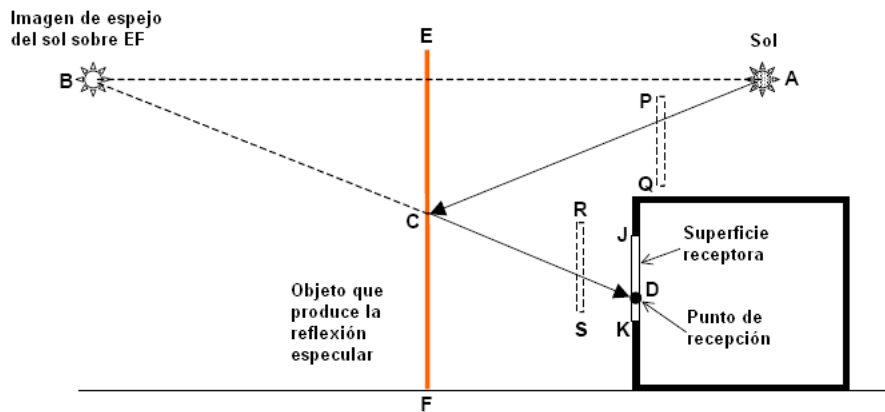
En la figura anterior se representa el análisis de un punto de la superficie de la ventana, del cual salen 15 rayos en distintas direcciones abarcando varios puntos, en este caso de un plano vertical y perpendicular a la ventana. En la figura se observa que los rayos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 alcanzan el plano del terreno, que los rayos 7, 8, 9, 10 y 11 alcanzan un obstáculo de la escena, que puede ser un edificio vecino. Los rayos 12, 13, 14, 15 y 16 llegan al cielo sin encontrar ningún obstáculo en su camino.

En el caso de existir rayos que alcancen el plano del terreno, en la figura anterior los rayos del 1 al 6, el método continúa analizando la radiación que llega a cada uno de estos puntos. Para ello, el proceso se repite de forma similar al la ventana pero utilizando como punto de análisis el punto de intersección del rayo con el terreno.



**Figura 37: Análisis por Ray-tracing de un punto del plano del terreno.**

En la siguiente figura se muestra como calcula el programa ENERGY PLUS la radiación reflejada especular.



**Figura 38: Esquema de cálculo de la radiación reflejada especular.**

En la imagen se calcula el punto de recepción de la radiación reflejada especular en el caso de que no exista ningún tipo de obstáculos, como pueden ser los que se marcan en líneas cortadas PQ o RS.

## 2.5. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

Ref. 1

“TRNSHD- A program for shading and insolation calculations”. Marion Hiller. University of Wisconsin-Madison, 1996

Ref. 2

“Fundamentals of Building Energy Dynamics”. Bruce D. Hunn

Ref. 3

“Energy Simulation In Building Design” J. Clarke

Ref. 4

Energy Plus Engineering Reference

Ref. 5

DOE-2 MANUAL

Ref. 6

“Solar radiation calculation methodology for building exterior surfaces”; Sánchez de la Flor, Fco. José; Ortiz Cebolla, Rafael; Molina Félix, José Luis; Álvarez Domínguez, Servando.

Ref. 7

“Modificaciones microclimáticas inducidas por el entorno del edificio y su influencia sobre las demandas energéticas de acondicionamiento”. Tesis Doctoral: Fco. José Sánchez de la Flor (2002).

Ref. 8

Weiler K. y Atherton P. 1977 “Hidden Surface Removal Using Polygon Area Sorting” SIGGRAPH77.

Ref. 9

[www.designbuilder.co.uk/programhelp/solar\\_options.htm](http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/solar_options.htm)

Ref. 10

[www.designbuilder.co.uk/programhelp/solar\\_radiation\\_distribution.htm](http://www.designbuilder.co.uk/programhelp/solar_radiation_distribution.htm)

### 3. ALGORITMOS DE GENERACIÓN DE SOMBRAS EN COMPUTACIÓN

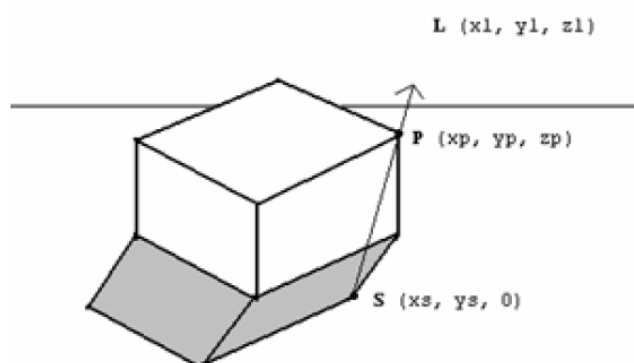
#### 3.1. INTRODUCCIÓN

El cálculo de sombras es un problema clásico en la computación tridimensional. La finalidad de la mayoría de algoritmos es la representación de escenas más realistas aplicadas a juegos y programas de renderizado, ya que la presencia de sombras aporta mayor relación espacial a la escena y mayor coherencia entre los objetos que forman la imagen.

Las primeras aproximaciones a la generación de sombras fueron por parte de Franklin Crow (Ref. 12), y posteriormente extendidas por Bergeron (Ref. 13) y Woo et al. (Ref. 14). La clasificación de los algoritmos de generación de sombras en computación distingue tres grandes grupos:

- sombras proyectivas,
- algoritmos de mapas de sombras y
- algoritmos de volúmenes de sombra.

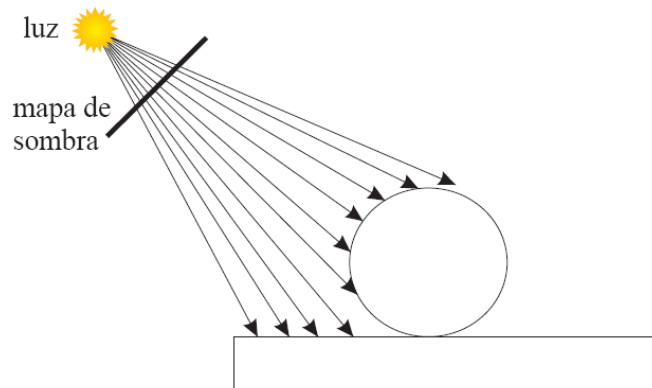
Las sombras proyectadas es una técnica que utiliza la proyección de los polígonos que forman la escena para crear los polígonos que representan la sombra. El algoritmo consiste en proyectar cada uno de los polígonos sobre el plano de otro utilizando una matriz de proyección para ello. Cada polígono proyectado es recortado para calcular la pieza del mismo que coincide con el polígono que generaba el plano donde se proyecta. De esta manera, el polígono obtenido del recorte es el que simboliza la sombra de uno sobre otro. Este algoritmo no tiene mucha utilización en la práctica ya que solamente permite la representación de polígonos planos.



**Figura 39: Representación de la técnica de sombras proyectivas.**

El siguiente grupo son los algoritmos de mapa de sombras. Esta técnica fue introducida por Lance Williams (Ref. 15) en el año 1978. Es un método cuyo funcionamiento no está limitado al número de polígonos o la complejidad que tenga la escena. El algoritmo trabaja con un buffer de profundidad el cual rellena desde el punto de vista de la fuente luminosa, por lo que cada punto de la escena visible desde el punto de luz tiene un valor determinado. Posteriormente, se regenera la escena desde el punto

de vista del observador y teniendo en cuenta los valores almacenados en el buffer para cada punto de la escena.



**Figura 40: Representación del mapa de sombras de una escena.**

El tercer grupo de algoritmos es el relacionado con los volúmenes de sombra. Estos métodos utilizan volúmenes poligonales para delimitar las regiones de sombra de una escena. Un volumen de sombra es una región espacial formada por semi-infinitos cuadriláteros llamados polígonos de sombra que delimitan el volumen en el que existe una sombra producida por algún polígono que forma la escena.

## **3.2. SHADOW VOLUME BINARY SPACE PARTITION TREES**

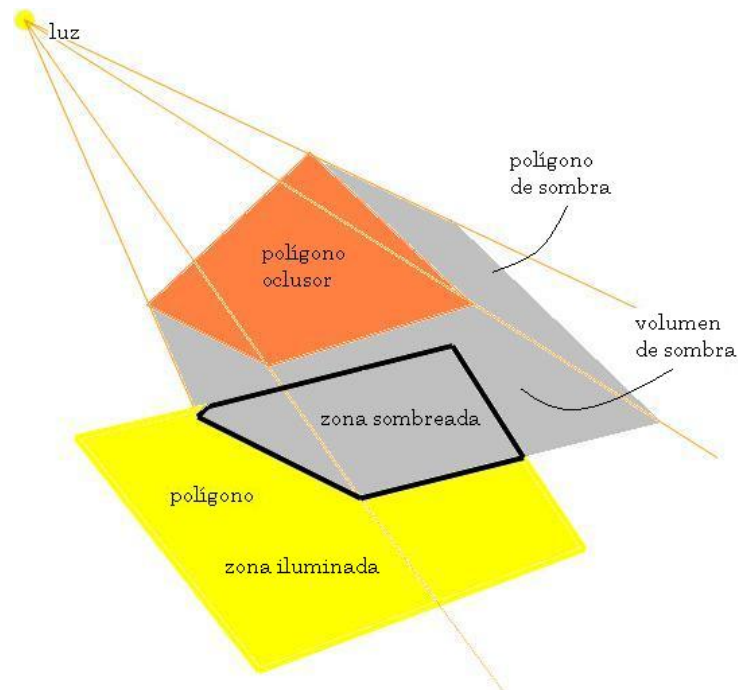
### **3.2.1. SHADOW VOLUMES**

Un volumen de sombras, shadow volume (SV), se forma a partir de una luz puntual y un cuerpo convexo que ocluye la luz que ésta irradia. Es en esencia el interior de la intersección de un conjunto de planos que forman una pirámide de altura infinita, cuyo vértice coincide con la luz puntual, y cuyos planos pasan por las aristas del objeto ocluidor que son compartidas por una pareja de caras (o polígonos) tal que una cara está orientada a favor de la luz y la otra en contra. El volumen de sombras corresponderá precisamente a la región del espacio donde no llega la radiación lanzada por la luz puntual debido a que es interceptada por el objeto ocluidor; dicho de otra manera, está formado por el conjunto de puntos que la luz no puede “ver” (es decir, no son linealmente alcanzables sin atravesar el objeto ocluidor). Una vez engendrada esta estructura puede utilizarse para determinar geoméricamente si un determinado elemento yace dentro de la región de sombra correspondiente al volumen.

El volumen de sombra se encuentra cerrado dentro de unos polígonos planos de sombra, los cuales se generan con el punto que representa la fuente luminosa y cada eje del polígono ocluidor. La dirección normal del plano de sombra determina cuál es la cara del plano que está a la sombra y cuál iluminada.

Todas las aristas del polígono ocluidor forman un recorrido cerrado en el espacio que junto a la luz puntual definen la pirámide de sombra; podemos pensar que este recorrido no tiene porque ser un polígono de vértices no coplanares, que será el que engendre de manera efectiva la región en sombra al definir, mediante los dos vértices en

los que acaba cada arista junto al punto de luz, los planos delimitadores del volumen de sombra.



**Figura 41: Volumen de sombra generado por un polígono formado por la parte interior de los tres planos de sombra señalados.**

### **3.2.2. BINARY SPACE PARTITION TREE (BSP TREES)**

#### **3.2.2.1. ORIGEN**

El método “Binary Space Partition” (BSP) consiste en la subdivisión jerárquica de un espacio  $n$ -dimensional en regiones homogéneas. Henry Fuchs, Zvi Kedem y Bruce Naylor (Ref. 16), en los inicios de los años 80, fueron los autores que desarrollaron la manera de implementar un árbol que representara particiones binarias de un espacio como método para determinar las prioridades de visibilidad en una escena tridimensional. Desde entonces, esta metodología ha sido utilizada para distintas aplicaciones como la detección de colisiones, la aceleración del método de ray tracing, la partición de polígonos en subpolígonos convexos o la generación de sombras.

El BSP trees (árbol de partición binaria de espacios) utiliza polígonos de  $n-1$  dimensiones para partir espacios  $n$ -dimensionales en dos subespacios convexos. A su vez, cada subespacio puede ser nuevamente dividido en otros dos subespacios de éste hasta completar que toda la escena esté dividida en subespacios elementales convexos. Toda la información sobre la partición de la escena está almacenada en la estructura del árbol. Cada nodo contiene la información de la forma  $(n-1)$ dimensional utilizada para la partición del espacio. En el árbol, cada nodo tiene dos ramas, una representa el subespacio delantero del mismo y la otra el subespacio que queda a su espalda.

El algoritmo se utiliza tanto para escenas dinámicas como para escenas estáticas. En el caso del estudio de sombras de un edificio, la escena es estática ya que los polígonos que representan las superficies exteriores del mismo permanecen en la misma posición a lo largo del tiempo.



Se debe comentar que el árbol BSP que representa la escena no tiene porqué ser único, es decir, la misma escena puede ser representada por diferentes árboles BSP, unos con mayor número de nodos que otros, según el orden y los planos elegidos para realizarlo, lo cual se refleja en que unos sean más rápidos a la hora de manejarlos en la finalidad determinada para la que se hayan construido.

### 3.2.2.2. PROCESO TEÓRICO DE GENERACIÓN DEL ÁRBOL BSP

En primer lugar se define una escena en el espacio de tres dimensiones (3D) formada por un conjunto de polígonos  $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$  planos (2D). Seguidamente se elige un polígono cualquiera del conjunto,  $P_k$ , el plano del cual divide el espacio en dos sub-espacios  $S_k$  y  $S_{\bar{k}}$ , uno de ellos queda en la cara positiva del polígono y otro en la cara negativa del mismo.

La relación que implica esta división es la siguiente: ningún polígono situado en el sub-espacio  $S_{\bar{k}}$  puede ocultar a un polígono del sub-espacio  $S_k$  una fuente luminosa que esté situada en el sub-espacio  $S_k$ .

El siguiente paso es agrupar cada uno de los polígonos restantes  $P - \{P_k\}$  en dos grupos, uno para cada sub-espacio,  $S_k$  y  $S_{\bar{k}}$ . En este procedimiento pueden darse algunas situaciones especiales:

- Intersección. En el caso en que uno de los polígonos,  $P_j$ , sea intersectado por el plano que representa el polígono  $P_k$ , se procederá a la división del mismo en dos polígonos, generando los polígonos  $P_{j,k}$  y  $P_{j,\bar{k}}$ , cada uno de los cuales pertenecerá a un sub-espacio distinto.
- Polígonos coplanares. Cuando exista otro polígono situado en el mismo plano que el polígono divisor,  $P_k$ , al generar ambos la misma división del espacio en  $S_k$  y  $S_{\bar{k}}$ , en la representación del árbol, ambos polígonos se situarán en el mismo nodo.

El método es recursivo, éste mismo procedimiento se repite para todos los polígonos de la escena hasta completar la clasificación de los mismos en el árbol.

Debido a que durante la creación del árbol BSP pueden ocurrir divisiones de polígonos, en la mayoría de las escenas el número de polígonos después de la creación del árbol BSP es mayor que el número de polígonos originales. La elección del polígono para particionar cada subespacio repercute drásticamente en el número de polígonos divididos.

A continuación se describe en forma de pseudocódigo el procedimiento seguido para la creación de un árbol BSP correspondiente a una escena de polígonos.

```

struct BSP_tree
{
    Plane partition;
    list polygons;
    BSP_tree *front, *back;
};

```

**Código 1: Estructura nodo árbol BSP**

Fuente: [http://www.cgafaq.info/wiki/BSP\\_tree\\_construction](http://www.cgafaq.info/wiki/BSP_tree_construction)

En primer lugar se crea una estructura llamada `BSP_tree`, la cual sirve de plantilla y describe los elementos que contiene cada nodo del árbol BSP. A continuación comentamos éstos elementos:

- el primer elemento es un objeto del tipo “Plano” y cuyo nombre es “partition”, el cual estará definido por su ecuación correspondiente  $f(x,y,z) = Ax + By + Cz + D$ . En un árbol BSP, cada nodo representa un plano, por tanto se necesita conocer la ecuación del mismo y poder comparar los restantes polígonos con la misma.
- el siguiente elemento que contienen los nodos del árbol BSP es una lista (objeto “List”) cuyo nombre es “polygons”. Se trata de un vector que va almacenando los distintos polígonos que se procesan y ubican en el mismo nodo del árbol BSP. Anteriormente se ha comentado que los polígonos que son coplanares se representan en el mismo nodo en el árbol, por tanto, cada nodo del árbol contiene un listado con todos los polígonos que representa.
- los últimos elementos de la estructura son dos punteros, uno llamado “front” y otro llamado “back”, cuya referencia son dos objetos también del tipo `BSP_tree`, es decir dos nodos del árbol BSP, uno representa la dirección del plano (“front”) y otro la dirección contraria (“back”). Estos dos nodos son los que descienden del propio nodo que estamos definiendo.

```

void Build_BSP_Tree (BSP_tree *tree, list polygons)
{
    polygon *root = polygons.Get_From_List ();
    tree->partition = root->Get_Plane ();
    tree->polygons.Add_To_List (root);
    list front_list, back_list;
    polygon *poly;
    while ((poly = polygons.Get_From_List ()) != 0)
    {
        int result = tree->partition.Classify_Polygon (poly);
        switch (result)
        {
            case COINCIDENT:
                tree->polygons.Add_To_List (poly);
                break;
            case IN_BACK_OF:

```

```

    back_list.Add_To_List (poly);
    break;
case IN_FRONT_OF:
    front_list.Add_To_List (poly);
    break;
case SPANNING:
    polygon *front_piece, *back_piece;
    Split_Polygon (poly, tree->partition, front_piece, back_piece);
    back_list.Add_To_List (back_piece);
    front_list.Add_To_List (front_piece);
    break;
}
}
if (! front_list.Is_Empty_List ())
{
    tree->front = new BSP_tree;
    Build_BSP_Tree (tree->front, front_list);
}
if (! back_list.Is_Empty_List ())
{
    tree->back = new BSP_tree;
    Build_BSP_Tree (tree->back, back_list);
}
}
}

```

**Código 2: Construcción árbol BSP**

Fuente: [http://www.cgafaq.info/wiki/BSP\\_tree\\_construction](http://www.cgafaq.info/wiki/BSP_tree_construction)

A continuación pasamos a explicar el algoritmo de construcción del árbol BSP el cual queda reflejado en la función llamada Build\_BSP\_tree. Esta función tiene como parámetros el puntero a un nodo inicial, que es el que representa el árbol llamado tree, y un listado de polígonos que son los que forman la escena, cuyo nombre es “polygons”.

El primer paso consiste en obtener la raíz del árbol BSP, en la cual se sitúa el primer polígono escogido de la lista y sobre el cual se van a procesar todos los demás. A continuación se crean dos listas, una para almacenar los polígonos que se encuentran en el subespacio anterior definido por el plano, “front\_list”, y otra para almacenar los polígonos que se encuentran en el subespacio posterior del plano, “back\_list”. El paso siguiente consiste en rellenar éstos dos listados de polígonos con los polígonos que forman la lista que se pasa a la función Build\_BSP\_tree.

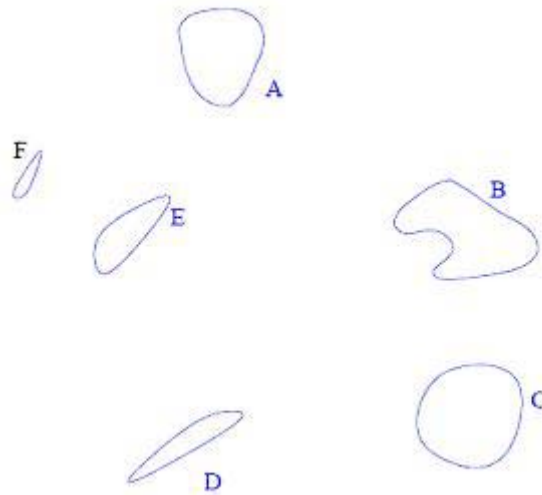
Una vez definido un nodo determinado, el cual representa un polígono, se pasa a clasificar todos los restantes polígonos de la lista “polygons” mediante las instrucciones contenidas dentro del bucle while del algoritmo. En primer lugar aparece la función “Classify\_Polygon”, la cual nos devuelve la posición del polígono siguiente de la lista con respecto al polígono que representa el nodo. El resultado es un entero que se almacena en la variable “result”, el valor de esta variable puede indicar cuatro posibles resultados:

- **COINCIDENT.** Indica que el polígono siguiente de la lista es coplanar al polígono del nodo que se procesa, por tanto éste se añade a la lista “polygons” del propio nodo.
- **IN\_BACK\_OF.** Indica que el polígono siguiente de la lista se encuentra en la cara opuesta de la normal del plano del nodo, por tanto el plano se añade a la lista de polígonos “back\_list” que se había creado en la función.
- **IN\_FRONT\_OF.** Al contrario que la opción anterior, ésta indica que el polígono se encuentra en el subespacio apuntado por la normal del plano del nodo y por tanto se añade a la lista de polígonos “front\_list” para su posterior procesado.
- **SPANNING.** Esta opción indica que el siguiente polígono de la lista está cortado por el plano representado por el nodo. Por lo tanto divide el polígono en dos partes, la parte que pertenece al subespacio delantero y la que pertenece al subespacio trasero. Cada una de esas dos partes se añade al listado correspondiente de polígonos, “back\_list” y “front\_list” respectivamente.

Una vez se han rellenado las listas “polygons”, del nodo, y “back\_list” y “front\_list”, de la función, se pasa al siguiente paso que consiste en procesar estas listas creando nuevos nodos para ello. Según indica el código, en el caso en que la lista de polígonos “front\_list” no esté vacía, se procede a crear un nuevo nodo, cuya dirección de memoria se almacena en el puntero “front” y el cual se crea de la misma manera que hemos descrito anteriormente, con una llamada a la función “Build\_BSP\_tree”, pero ésta vez se pasan como parámetros, el nuevo nodo creado y la lista de polígonos pertenecientes al subespacio delantero dejado por el plano del nodo. El mismo procedimiento se sigue para el desarrollo del árbol a partir del nodo “back”, de manera que la función de creación del árbol BSP es una función que se llama a sí misma ya que el procedimiento es un procedimiento recursivo, cuyo final se produce cuando terminan los polígonos de la escena que hay que procesar, es decir, cuando se llega a un nodo en que ya no tiene más polígonos en ninguna de las listas “back\_list” y “front\_list”.

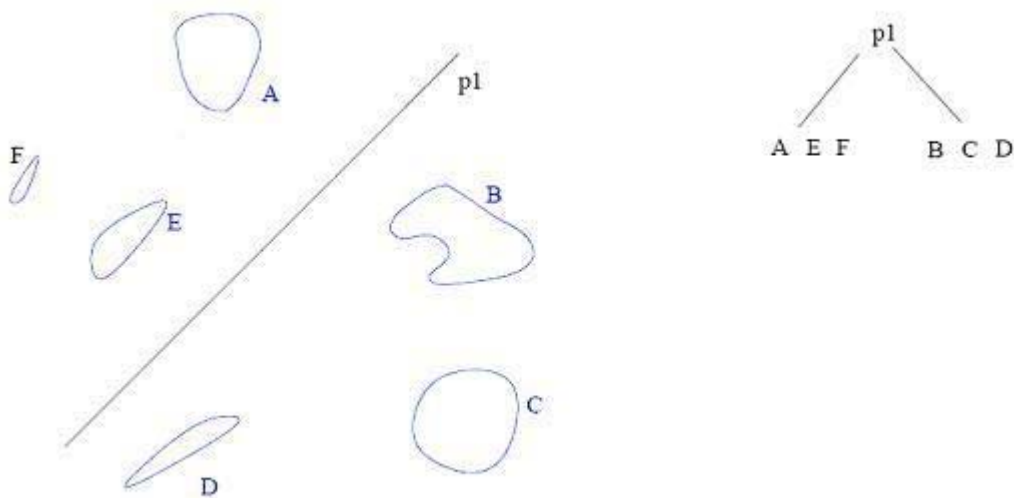
### **3.2.2.3.PROCESO DE GENERACIÓN DEL ÁRBOL BSP EN UNA ESCENA DE POLÍGONOS**

El proceso de partición binaria del espacio se puede representar en forma de árbol, para ello se utilizan los planos de partición como nodos internos del árbol y los objetos que forman la escena como hojas del árbol. En la figura se representa una escena en dos dimensiones, por lo que los planos de partición de la escena en este caso son líneas. Se parte de una escena inicial representada por la siguiente figura, en la que aparecen seis polígonos denominados A, B, C, D, E y F.



**Figura 42: Escena inicial con polígonos.**

Se pretende generar una serie de planos, en este caso representados por líneas, que tengan como finalidad dividir la escena en partes. En primer lugar se añade un plano, en el caso de la figura representado por una línea llamada p1 que divide el espacio en dos subespacios, uno de los subespacios está situado en la parte superior de la escena, en la que se sitúan los polígonos A, F y E, mientras que el segundo subespacio generado por la división del plano p1 contiene los polígonos B, C y D.

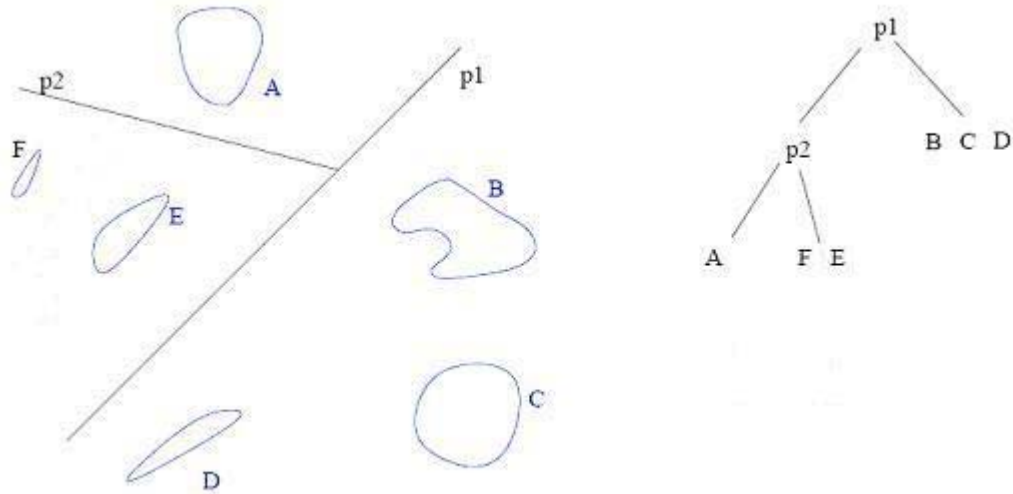


**Figura 43: Inserción del plano "p1" e inicio del árbol BSP.**

En la parte derecha de la figura se representa el árbol de partición binaria, en él se sitúa como nodo inicial el primer plano de la figura. Como el nombre indica, se trata de una división binaria, por tanto, de éste nodo descienden dos ramas, cada una de ellas representa uno de los subespacios generados, y en cada una se colocan como hojas del árbol los polígonos pertenecientes a cada uno de estos subespacios.

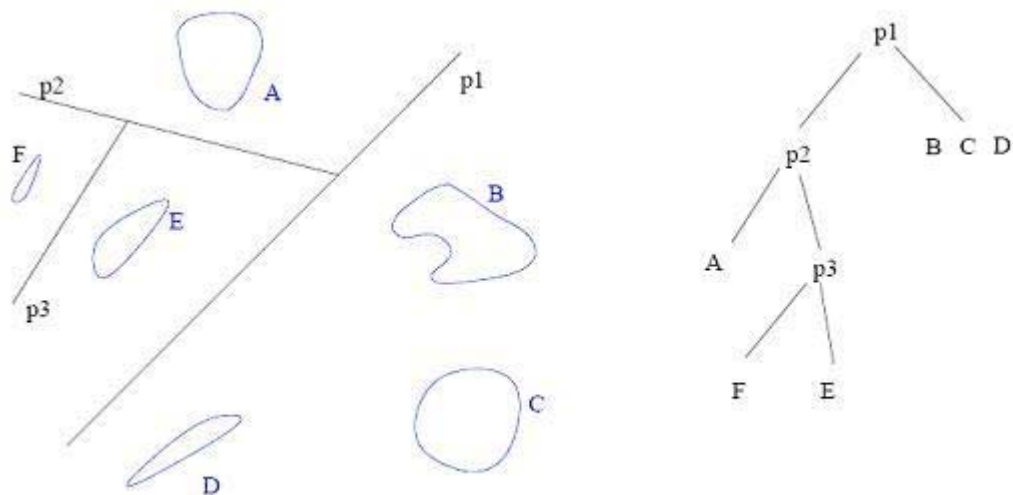
El proceso es recursivo, por lo que podemos dividir la escena tantas veces como queramos, o podemos parar si la división de la escena es la suficiente para nuestro fin. Siguiendo con el ejemplo de la escena, vamos a generar algunas divisiones más de la

misma hasta dejar cada uno de los polígonos iniciales en una hoja determinada del árbol. Para ellos, el siguiente paso consiste en generar un plano para dividir uno de los dos subespacios creados por p1. Este nuevo plano recibe el nombre de p2 en la siguiente figura y separa el subespacio superior en dos partes.



**Figura 44:** Escena inicial con los planos de división p1, p2 y p3. En la parte derecha se representa el árbol BSP de la escena.

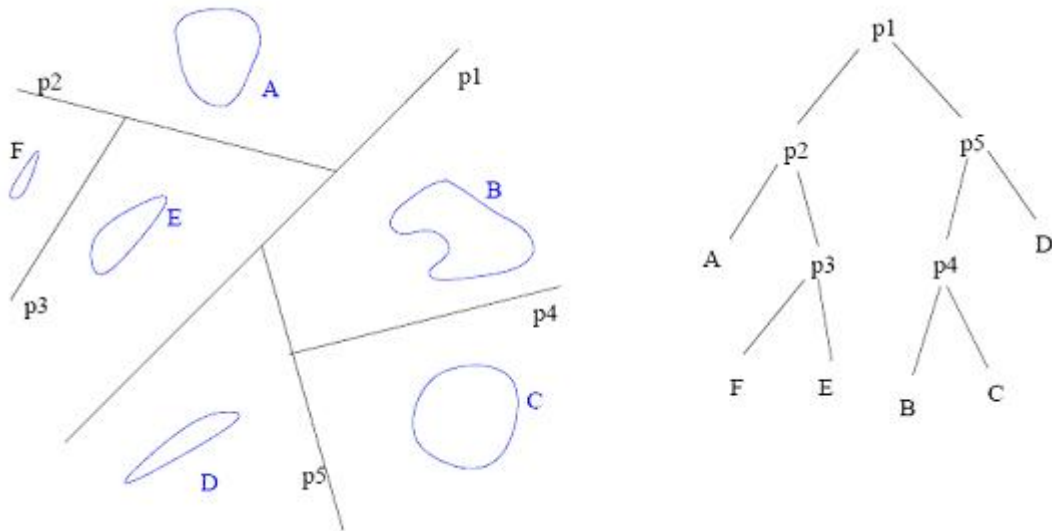
El plano p2 se incorpora en una de las ramas del árbol que desciende de la raíz inicial. Este nuevo plano divide el subespacio en otros dos subespacios más pequeños, uno contiene el polígono A y otro los polígonos F y E. El siguiente paso para poder definir cada polígono en un subespacio diferente es generar otro plano que separe el subespacio de los polígonos F y E. Para ello utilizamos el plano p3 que se representa en la siguiente figura.



**Figura 45:** Planos p1, p2 y p3 sobre la escena inicial y su representación en árbol BSP.

El nuevo plano incorporado p3 se sitúa en una de las ramas que desciende del nodo p2, mientras que los polígonos F y E se sitúan, por su parte, en cada una de las ramas que descienden de p3. Con la incorporación de éstos planos se consigue colocar

los planos A, F y E en ramas distintas del árbol. Si seguimos el mismo procedimiento con el subespacio inferior conseguimos desarrollar la rama derecha del nodo inicial p1. En la figura siguiente se representa la escena anterior con la incorporación de dos planos más p4 y p5 que dividen el subespacio inferior de tal manera que los polígonos B, C y D se colocan en hojas separadas.



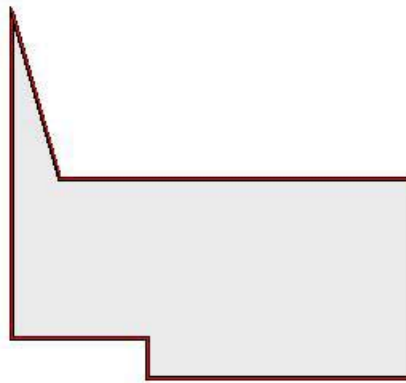
**Figura 46: Escena inicial y árbol BSP completo.**

La representación en el árbol BSP de los nuevos planos p4 y p5 se representa en la parte derecha del mismo. En primer lugar se añade el plano p5 el cual divide el subespacio inferior de manera que aísla el polígono D de la escena, el cual se representa en una de las ramas del nodo p5. En la otra rama se añade el plano 4 el cual divide el subespacio restante de tal manera que se separan los polígonos B y C. Estos dos polígonos se representan en el árbol en las dos hojas que descienden del plano p4.

### **3.2.2.4. APLICACIÓN DEL ALGORITMO BSP EN LA DEFINICIÓN DE POLÍGONOS**

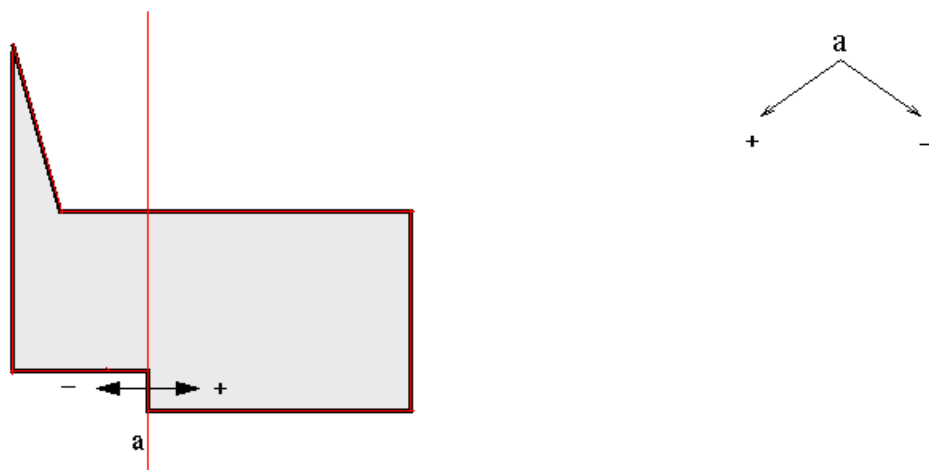
El siguiente paso lo realizaron Thibault y Naylor (Ref. 17) cuando mostraron que utilizando árboles BSP se podía representar cualquier poliedro sólido. En este trabajo, cada nodo del árbol representaba un plano de los que formaban el poliedro, y cada hoja representaba el interior (“in”) o el exterior (“out”) del poliedro. Partiendo de este principio, cualquier poliedro podía ser representado en un árbol BSP teniendo en cuenta que cada una de las hojas del mismo representaba uno de los planos formadores del mismo, y que cada una de esas hojas tenían otra para representar un lado del polígono y otro.

En el siguiente ejemplo se muestra el método para definir un poliedro en un árbol de partición binaria. Partimos de la escena, del polígono de la figura inicial, en este caso, igual que el anterior representamos el poliedro en forma de polígono en dos dimensiones y los planos divisores del espacio como líneas.



**Figura 47: Poliedro que se va a definir en forma de árbol BSP.**

El primer paso del proceso consiste en escoger una superficie del poliedro como plano inicial para generar el árbol BSP. En la siguiente figura se representa el plano elegido con el nombre de “a” perteneciente al plano inferior izquierdo del polígono de la figura.



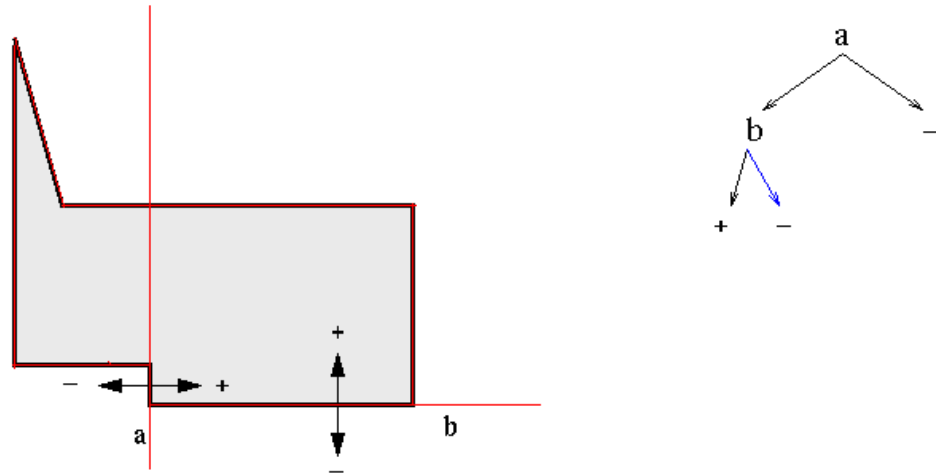
**Figura 48: Poliedro inicial con el primer plano “a” de la escena.**

En la parte derecha de la figura se representa el árbol BSP de la figura, en él se coloca como nodo inicial o nodo raíz el primer plano escogido para la representación, el plano “a”. Este primer plano separa el espacio en dos partes, si observamos la cara del polígono que representa el plano “a”, hay una cara del plano que está fuera del mismo y otra que está en su interior, cada una de estas dos caras se representan como una rama que desciende del nodo “a”. La cara que está situada en la parte interior del polígono se representa con el signo positivo, mientras que la cara que indica el exterior lo hace con el negativo.

El siguiente paso consiste en desarrollar el árbol definiendo como nodos cada una de las restantes caras del poliedro hasta colocarlas todas en el árbol. Por tanto, definimos un nuevo plano llamado “b” que contienen la cara inferior derecha del poliedro. Este nuevo plano parte el subespacio que habíamos definido como positivo de



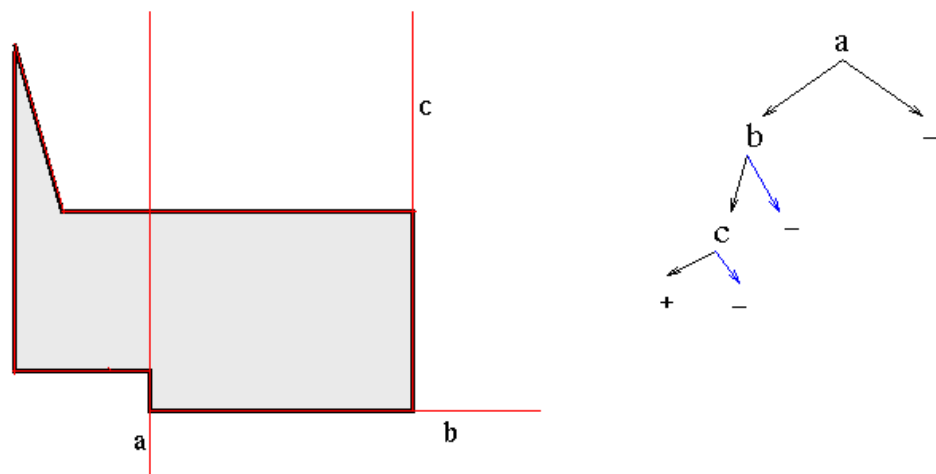
la partición del plano raíz “a”, y deja a su vez dos nuevos subespacios en la figura, uno positivo y otro negativo. Si observamos la figura, la división positiva será el subespacio superior, que es donde se encuentra el interior del polígono, mientras que la parte negativa es el subespacio inferior donde no hay polígono.



**Figura 49: Poliedro inicial con dos planos y su representación en árbol BSP.**

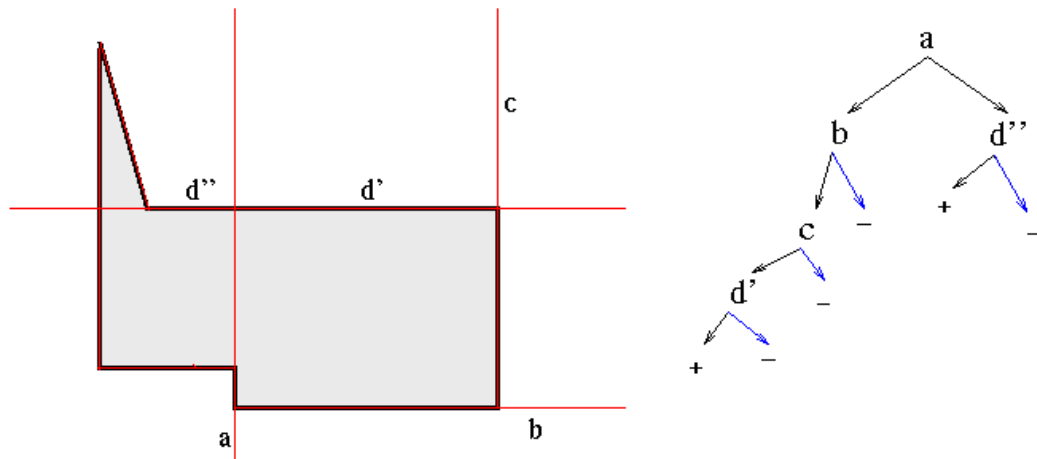
La colocación del nodo “b” que representa el plano “b” de la figura se realiza en la rama positiva de que salen del nodo raíz, ya que el subespacio en el que se encuentra el plano “b” pertenece a la región donde la cara inicial indica el interior del poliedro. A su vez, del nodo “b” salen también dos ramas, una positiva que apunta hacia el subespacio creado en la parte superior y otra negativa que lo hace en sentido inverso tal y como se representa en la figura anterior.

A continuación colocamos mediante el mismo procedimiento el plano “c” que define la cara derecha del poliedro. El nodo que representa el nuevo plano se coloca descendiente del nodo “b” en su rama positiva ya que es en este subespacio donde se ubica el nuevo plano creado.



**Figura 50: Representación de tres caras del poliedro en el árbol BSP.**

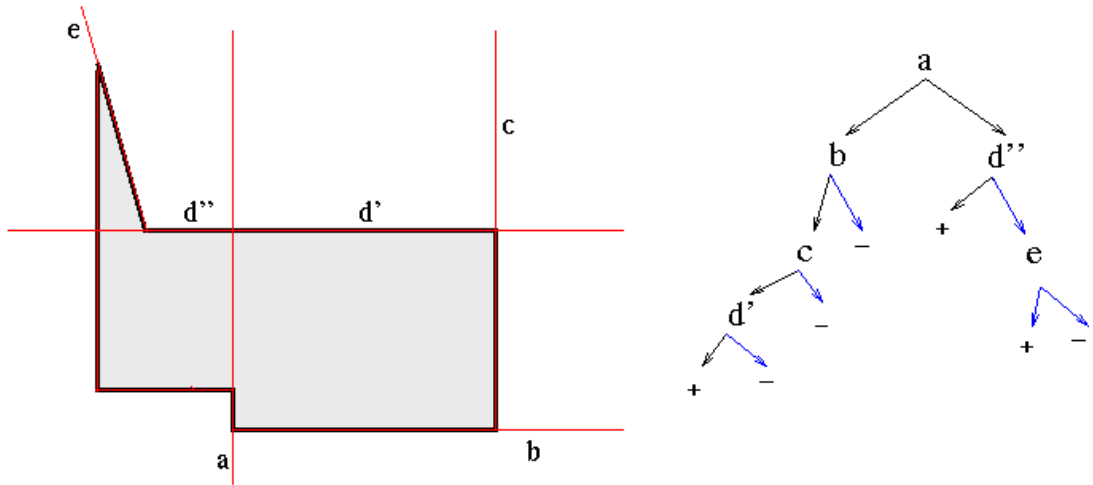
Hasta ahora no había ningún problema ya que cada cara del poliedro no estaba cortada por ningún plano de los creados anteriormente “a”, “b” o “c”. Pero con la incorporación de la nueva superficie “d”, cara superior del polígono, observamos que ésta está cortada en dos partes por el plano inicial “a”. Para poder representar esta superficie en el árbol BSP necesito partirla en dos partes, cada una a un lado del plano “a”, una en el subespacio positivo que define éste y otra en el subespacio negativo. Estas partes las nombro como “d’”, para la del subespacio positivo y “d’’” para la del subespacio negativo, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 51: Incorporación de la cara d representada por los planos d’ y d’’ y colocación de los mismos sobre el árbol BSP.**

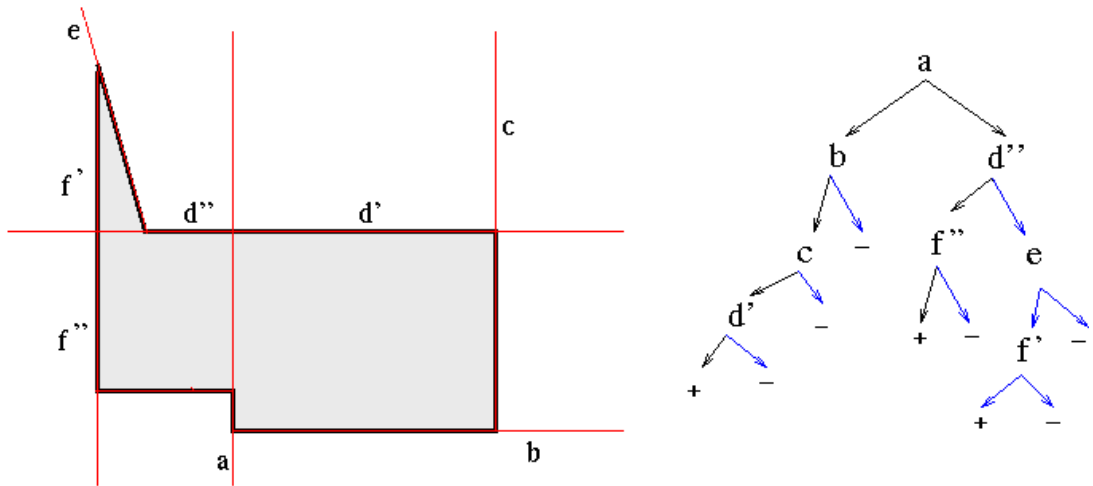
Como observamos en la figura anterior, cada uno de los dos nuevos planos definidos para la cara se sitúa en una rama diferente. El plano “d’” se sitúa en la rama positiva del nodo “c” mientras que el plano “d’’” se coloca en la rama negativa que sale del nodo “a”. Esta colocación se debe a que el subespacio generado por el plano “c” está delimitado por la izquierda por el plano “a” que divide dos subespacios más grandes.

Siguiendo con el mismo procedimiento creamos un nuevo plano “e” para la cara inclinada del poliedro, el cual se sitúa entero en el subespacio positivo creado por el plano “d’’”, como se observa en la siguiente figura.



**Figura 52: Incorporación del plano “e” en la escena y en el árbol BSP.**

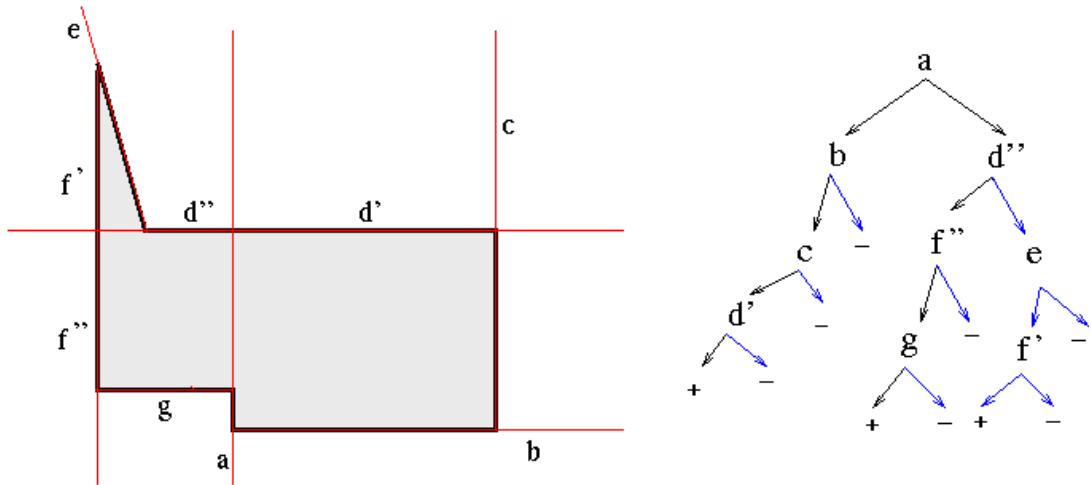
Igual que la cara d había sido cortada por uno de los planos que anteriormente se habían utilizado en la figura, ocurre lo mismo con la cara f, la cual se ha dividido en dos planos que la definan, el plano “f’” y el “f’””, esta vez es el plano “d’” el que divide la cara en dos partes y uno de ellos queda en la rama positiva definida por el mismo y otro en la negativa.



**Figura 53: Incorporación de la cara f que debe ser dividida en dos.**

En la incorporación de los nuevos planos sobre el árbol BSP se observa que el plano “f’” se ubica en la rama positiva descendiente de e, mientras que el nuevo plano “f’”” lo hace en la cara positiva del plano “d’””. El criterio de esta colocación es el mismo que se ha seguido en el caso de los planos “d’”” y “d’””.

Finalmente termina el proceso con la incorporación del último nodo que representa la última cara y último plano de la escena. Se trata del plano llamado “g” el cual se coloca en el árbol BSP descendiente en la rama positiva de “f’””. De esta manera se ha conseguido definir el poliedro en forma de árbol BSP, lo cual representa una ventaja a la hora de visualizar la escena.



**Figura 54: Representación final de la escena con todos los planos de las caras y su colocación en el árbol BSP.**

**Fuente:** <http://groups.csail.mit.edu/graphics/classes/6.838/S98/meetings/m13/BSP.html>

Ahora cada nodo del árbol representa una cara del polígono, mientras que cada una de las hojas finales del árbol representan si un punto está dentro (+) o fuera (-) del mismo. Para ello hay que situar el punto dentro del árbol y observar en qué hoja se coloca finalmente. A continuación definimos un algoritmo para colocar un punto dado sobre el árbol y clasificarlo dentro ó fuera del poliedro (también puede que esté sobre una de las caras del poliedro).

Definimos el nodo  $v$  y el punto  $p$ .

```

clasificar_punto( v, p )
{
    if v es una hoja
        return valor_de_la_hoja ("in" ó "out")
    else
        {
            if p está en la cara negativa del plano( v )
                {
                    return clasificar_punto ( v.left, p );
                }
            else
                {
                    if p está en la cara positiva del plano( v )
                        {
                            return clasificar_punto ( v.right, p );
                        }
                    else (p está en el plano)
                        {
                            l = clasificar_punto ( p, v.left );
                            r = clasificar_punto ( p, v.right );
                            if l = r
                                return r;
                            else

```

```

}
}
}
}
return "on";
}

```

**Código 3: Función para clasificar un punto respecto de un plano.**

### **3.2.3. SHADOW VOLUMES BINARY SPACE PARTITION TREES (SVBSP)**

Partiendo del trabajo de Kedem y Naylor (Ref. 16). En el que se describía el modo de generar árboles BSP para hacer particiones del espacio y de la posterior aplicación de Thibault y Naylor (Ref. 17) para definir cualquier poliedro en el espacio a través de los planos que lo forman, surge la adaptación del método de árboles BSP aplicados a la definición de los volúmenes de sombras (SVBSP trees). Este trabajo fue elaborado por Chin y Feiner (Ref. 18) en 1989.

Este método de generación de sombras tiene su mejor aplicación en escenas estáticas, es decir, aquellas donde los polígonos permanecen en la misma posición y es la fuente luminosa la que tiene un movimiento. Aunque Chrysanthemum y Slater (Ref. 20) han extendido el método para escenas dinámicas. El algoritmo tiene por objetivo determinar cuáles son las superficies de los objetos que forman la escena que se encuentran iluminadas. Para ello se generan las superficies que forman los volúmenes de sombra, las cuales cortan a los polígonos de la escena, y cuya intersección divide el polígono entre la parte sombreada y la parte iluminada.

El método Shadow Volume BSP tree es una modificación de la versión general del algoritmo de BSP tree. En este caso, cada nodo interno del árbol se asocia con un plano de sombra definido por un punto y una línea. El punto es la posición de la fuente luminosa, y la línea es una arista de un polígono de la escena.

La dirección de la normal del plano es la que determina el semi-espacio en el que se encuentra el polígono que genera la sombra. Por tanto, en este caso, al generar el árbol, determinaremos el sub-espacio donde hay sombra y el sub-espacio iluminado.

Los planos de sombra formados desde cada arista del polígono generador son filtrados en el árbol y se van añadiendo al mismo en el caso en que se encuentren en la zona iluminada. Después de procesar todos los volúmenes de sombra, en el árbol queda representado un volumen complejo formado por la unión de cada volumen de sombra. El algoritmo consta de dos pasos básicos cuya ejecución se realiza para cada uno de los polígonos que componen la escena y estén orientados hacia la luz:

- El cálculo de las sombras. Cuando se procesa un polígono nuevo, éste se filtra a través del árbol SVBSP para determinar qué partes del mismo están sombreadas y qué partes no.
- Desarrollo del árbol SVBSP. La parte iluminada del nuevo polígono que se procesa se añade a la estructura del árbol para considerarla como nuevo polígono ocluidor de la escena y tener en cuenta la pirámide de sombra que forma.

Cada uno de los polígonos de la escena debe ser procesado y comparado con las sombras arrojadas por todos los restantes polígonos que forman la escena para poder determinar si se encuentra dentro del volumen de sombra que forma cualquier otro. Una de las estrategias más importantes para agilizar la creación de las sombras mediante este algoritmo es utilizar un orden de procesamiento de los polígonos que vaya desde el más cercano al punto de luz hasta el más alejado. De esta manera, a la hora de generar el árbol SVBSP cada nuevo polígono que se procese deberá ser comprobado con los volúmenes de sombra ya creados por los polígonos más cercanos a la luz que son los únicos que pueden encerrarlo en sus volúmenes de sombra.

#### **3.2.4. FUNCIONAMIENTO MÉTODO SHADOW VOLUMES**

A continuación se muestra el funcionamiento del método Shadow Volumes y la generación del árbol BSP aplicado al estudio de las sombras de una escena con polígonos en tres dimensiones.

Para poder aplicar el método de los árboles BSP a la generación de sombras es necesario tener en cuenta una serie de pasos que facilitan el algoritmo y agilizan el mismo para generar los polígonos de sombra:

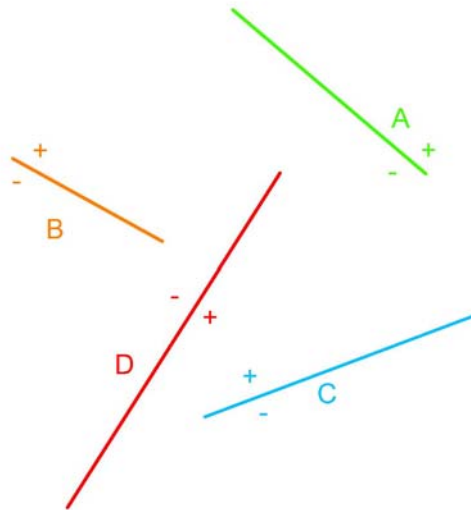
- Generación de un árbol BSP de los polígonos de la escena

En primer lugar se comenta el primer paso, que consiste en generar un árbol BSP de los polígonos que forman la escena. Para ello se utilizan los planos de los polígonos como planos de partición del espacio, y por tanto, el árbol BSP de la escena contendrá estos planos en sus nodos.

Debido a que durante la creación del árbol BSP pueden ocurrir divisiones de polígonos, en la mayoría de las escenas el número de polígonos después de la creación del árbol BSP es mayor que el número de polígonos originales. La elección del polígono para particionar cada subespacio repercute drásticamente en el número de polígonos divididos.

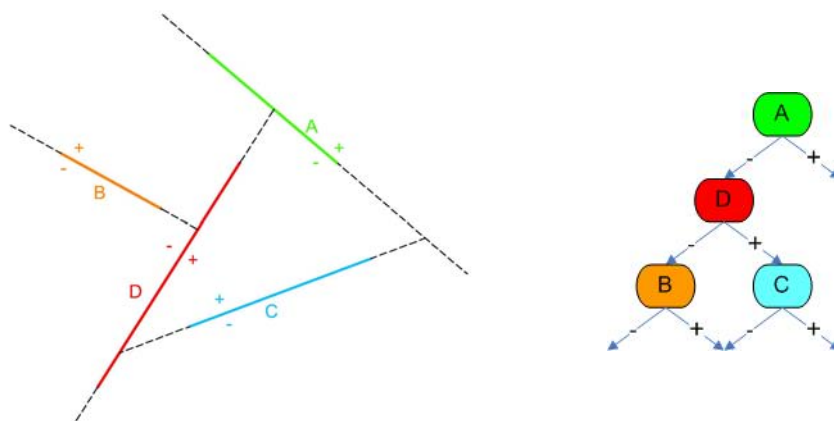
De todos los árboles BSP que representan la misma escena, aquel con el menor número de nodos será el que permita un despliegado más rápido del mismo, debido a que para cada polígono que compone el escenario, se deben realizar operaciones para determinar la posición del punto de luz respecto al plano de ese polígono, por lo que la disminución del número de polígonos reduce el número de cálculos.

A continuación se muestra una escena donde se representan cuatro polígonos, como la escena se representa en dos dimensiones, en este caso los polígonos son líneas. Y posteriormente se crean los árboles BSP que definen la escena siguiendo distintos órdenes para la creación de los mismos.



**Figura 55: Escena inicial de polígonos en 2D.**

En el primero de los ejemplos se elige el siguiente orden de polígonos: A-D-B-C. Como puede observarse en la figura siguiente, cada uno de los polígonos representa un plano de corte de la escena, y con ello una división binaria del espacio existente. El primer plano es el del polígono A, como se observa en el árbol BSP adjunto, y éste divide el espacio en dos subespacios, en la parte del mismo definida como positiva no existe ningún otro polígono, por lo que la rama positiva del nodo queda vacía. Los demás polígonos de la escena se sitúan en el subespacio negativo, por lo que de ésta rama desciende el segundo de los polígonos elegidos. Se trata del polígono D, que divide el subespacio en el que está en otras dos mitades. En cada una de ellas existe un polígono distinto, el polígono B para el subespacio negativo y el polígono C para el subespacio positivo.



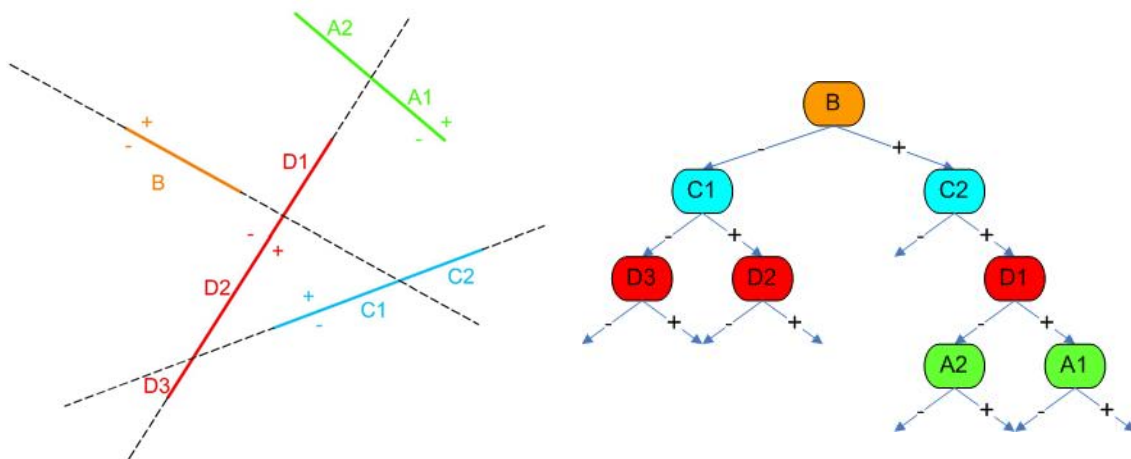
**Figura 56: Representación de la escena con el orden de polígonos A-D-B-C.**

Como se observa, en este primer ejemplo se ha creado un árbol BSP en el que no se ha producido ninguna división de polígonos ya que ninguno de los planos divisorios lo propiciaba. A continuación se presenta la misma escena de polígonos, pero en este caso el orden elegido para la generación del árbol BSP es la de B-C-D-A.

La elección del polígono B como nodo inicial produce la división de dos de los polígonos de la escena, se trata de los polígonos C y D que se dividen en C1-C2 y D1-

(D2+D3) respectivamente. La elección posterior del polígono C vuelve a crear otra nueva partición en el polígono (D2+D3), pasando a D2-D3. En el árbol BSP de la figura siguiente se aprecia la ubicación distinta de cada una de las particiones de éstos polígonos sobre las ramas de los distintos nodos. Finalmente, la elección de D como tercer polígono produce una partición del espacio que afecta al polígono A dividiendo éste en A1-A2.

La elección de este orden para la generación del árbol BSP de la escena produce una partición de todos los polígonos salvo el polígono raíz, con lo que el árbol que se representa es el mucho más complejo que el del ejemplo anterior.



**Figura 57: Representación de la escena con el orden de polígonos B-C-D-A.**

Existen varias técnicas para la elección del polígono raíz, y se basan en la comprobación de las particiones que produce la elección de uno u otro polígono, por lo que suelen ser más lentas a medida que se quiera obtener un árbol BSP más sencillo de la escena.

- Ordenar “front to back” los polígonos con el algoritmo de “traverse tree”

Para la ordenación de los polígonos de la escena desde el más cercano al más alejado se utiliza el algoritmo “front to back” en el árbol BSP. El método consiste en comparar de forma recursiva el punto de luz respecto el plano que representa un nodo del árbol BSP, empezando por el nodo raíz.

El siguiente código muestra la función utilizada para recorrer el árbol BSP y ordenar los polígonos de la escena de manera que queden en orden desde el más alejado respecto al punto de luz hasta el más cercano. El orden inverso del vector indica por tanto el sentido contrario, desde el más cercano al más alejado.

```

fromLightWalkTree(BSP_tree* tree,point luz)
{
Posicion_luz = tree->find_location(eye);

if(tree->empty())
return;

```



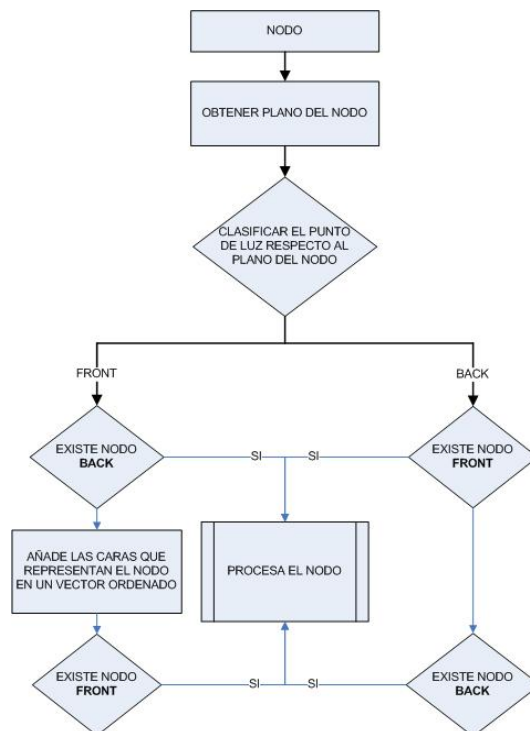
```

if(posicion == "FRONT")
{
    fromLightWalkTree (tree->back, luz);
    if(tree->polygon_list[i])
    {
        Add_vector_orden(tree->polygon_list[i++]);
    }
    fromLightWalkTree (tree->front, luz);
}
else if(posicion == "BACK" || posicion == "ON")
{
    fromLightWalkTree (tree->front, luz);
    fromLightWalkTree (tree->back, luz);
}
}

```

**Código 4: Ordenación de los polígonos del árbol BSP desde el plano más cercano a la luz al más alejado.**

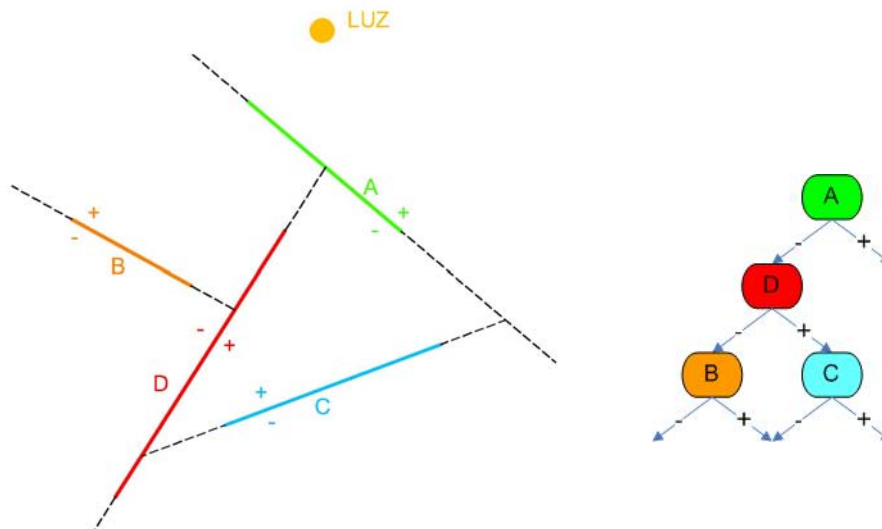
A continuación se muestra un diagrama de flujo del algoritmo, en él se describe el proceso de ordenación de los planos del árbol BSP respecto al punto de sombra. Al tratarse de un proceso recursivo, el proceso tiene llamadas a la propia subrutina, lo cual queda reflejado en la llamada al proceso "Procesa el módulo" el cual representa la misma función que se está describiendo.



**Figura 58: Diagrama de flujo del algoritmo "front to back" para la ordenación de los polígonos de una escena mediante el árbol BSP.**

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación del método a la escena de polígonos en 2D que se había mostrado anteriormente. La colocación del punto de luz

se sitúa en la parte superior de la escena y se muestra la secuencia de polígonos que se obtiene en la misma al aplicar la función anterior llamada fromLightWalkTree para obtener un orden de los mismos respecto al punto luminoso.

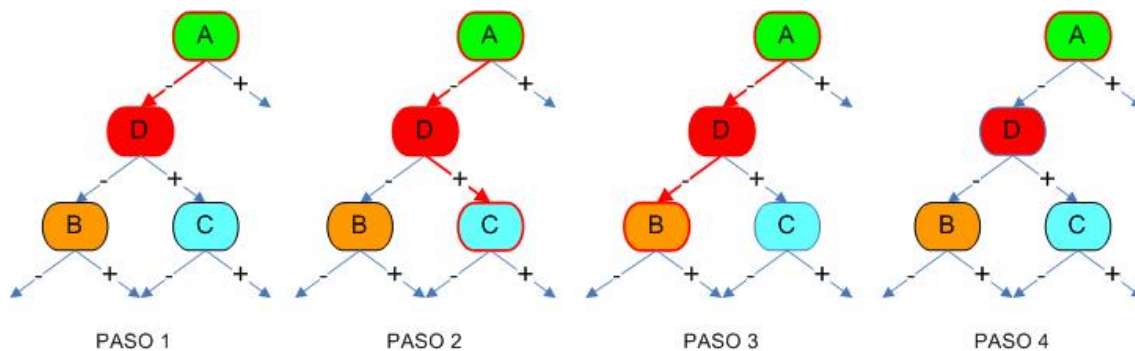


**Figura 59: Escena inicial con un punto de luz y árbol BSP de la misma.**

En primer lugar el algoritmo calcula la posición del punto luminoso respecto al plano representado por el nodo raíz, A, del árbol BSP. Como se comprueba en la figura anterior, el resultado de la comprobación es que la luz se encuentra en la cara positiva del plano, que en el código llama FRONT. El siguiente paso consiste entonces en determinar la posición de la luz para el nodo que desciende de A en la parte BACK o negativa. En este caso es el plano D, y se comprueba que la luz está en la cara BACK del mismo, lo que significa que el polígono está de espaldas a la luz y por tanto no entrará a formar parte del cálculo de sombras.

Continúa el algoritmo con el nodo FRONT de D, que es C, el cual al tener la luz de cara y no tener nodos inferiores pasa a formar parte del vector de polígonos a tratar. El siguiente, según el algoritmo es el que se encuentra en la rama negativa de D, es decir B, que al tener el punto de luz de frente y no tener nodos descendientes se añade también al vector de polígonos.

Finalmente se trata el plano A, que al tener la luz en su cara frontal y tener las ramas descendientes ya tratadas, pasa a añadirse a la lista de polígonos. Con todo ello concluimos que el orden de aparición de los polígonos es C-B-A, los cuales están ordenados en sentido del más alejado a la luz al más cercano. Para el posterior cálculo de sombras utilizaremos el sentido contrario, “front to back”, por lo que utilizaremos el orden de A-B-C para tratar los polígonos de la escena.



**Figura 60: Pasos del algoritmo de ordenación de los polígonos respecto al punto de luz.**

- Generar el árbol SVBSP junto con los polígonos de sombras.

En la siguiente figura se representa de un diagrama del algoritmo de creación del árbol SVBSP. Como se puede observar en ella, el primer paso consiste en seleccionar el polígono inicial de una lista de polígonos ordenados desde el punto de luz, como se ha comentado antes. A continuación se crean los planos de sombra generados por el polígono y se añaden al árbol BSP que está vacío. Cada plano de sombra está definido por el punto de luz y una de las aristas del polígono. Por lo tanto, se añaden tantos planos de sombra como aristas tiene el polígono.

Cada plano de sombra queda representado en el árbol por un nodo, el cual posee dos ramas que descienden de él. Una representa el subespacio que queda a un lado del plano y la otra representa el otro subespacio. Para añadir el siguiente plano de sombra, en primer lugar hay que conocer en cuál de los dos subespacios se sitúa, y en función de ello se representará en una u otra rama del árbol. En los ejemplos que se muestran más adelante se comentan ésta y otras situaciones que se dan en el proceso de construcción del árbol.

El procesado del primer polígono es el más sencillo ya que sobre él no existe ninguna sombra, por ser éste el más cercano al punto de luz. En el diagrama aparece una decisión, si ya no existe ningún polígono más en la lista, el proceso ha terminado, pero en el caso de existir más polígonos, el proceso continúa con el siguiente polígono de la lista.

A partir del segundo polígono aparece la necesidad de clasificar el mismo respecto a los planos de sombra del árbol SVBSP generados por los polígonos anteriores. En la clasificación pueden darse tres situaciones distintas:

- Que el nuevo polígono se encuentre entero en la parte iluminada, lo cual implica que no tiene sombras sobre él.
- Que el nuevo polígono se encuentra entero en la parte interior del volumen de sombra generado por los polígonos anteriores, por lo que todo el polígono es un polígono de sombra y no se añaden nuevos planos de sombra al árbol SVBSP.
- Que el nuevo polígono posea una parte en sombra y otra en la luz, con lo que el polígono habrá que dividirlo en dos, uno que esté en la parte

sombreada,  $p\_sombra$ , y otro en la parte soleada,  $p\_sol$  para que se procesen de forma separada.

Según el resultado del proceso anterior, el polígono se seguirá clasificando con respecto al plano que representa el nodo de sombra o de sol que desciende del anterior. En el caso de que el nuevo polígono se encuentre en la primera situación, todo al sol, y no exista ningún nodo descendiente en el árbol para esta situación, se procederá a añadir los nuevos planos de sombra generados de la escena y por tanto los nuevos nodos del árbol SVBSP para seguir el proceso con otro polígono de la lista.

En el caso en que el polígono se encuentre clasificado como en sombra y no exista ningún nodo descendiente en el árbol SVBSP para esta situación, no se añade ningún plano de sombra nuevo a la escena y el polígono queda en la sombra.

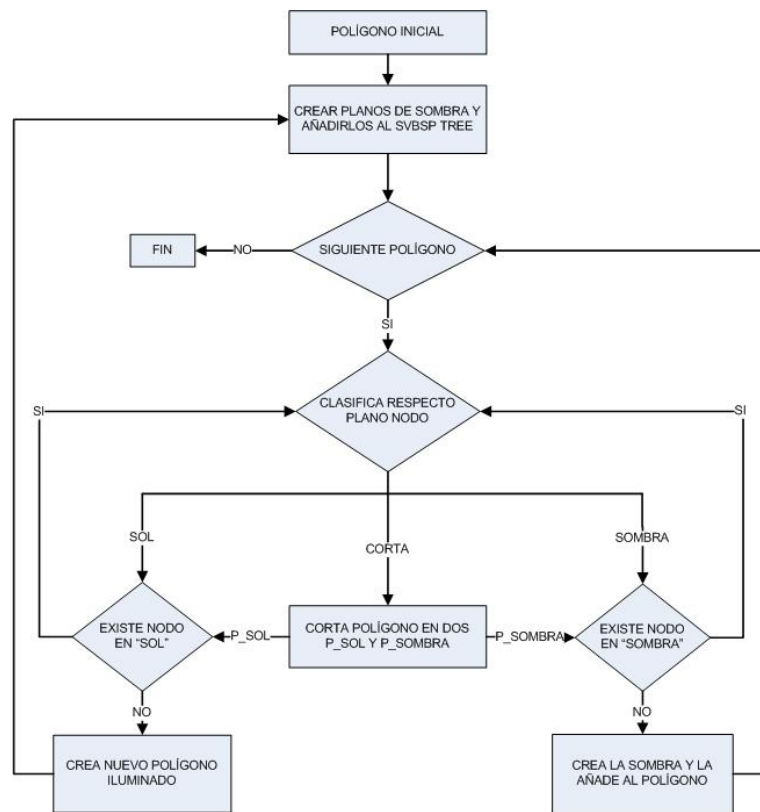


Figura 61: Algoritmo de generación del árbol SVBSP.

### 3.2.5. EJEMPLOS APLICACIÓN DEL MÉTODO SHADOW VOLUMES

Para poder explicar mejor el funcionamiento del algoritmo se exponen algunos ejemplos y se comenta la construcción del árbol “Shadow Volumes Binary Space Partition” (SVBSP) de la escena para cada uno de ellos, y por tanto la generación de las sombras generadas de unos sobre los otros.

En los ejemplos que aparecen a continuación, las escenas están compuestas por dos polígonos, uno azul que siempre es el más próximo a la luz y otro de distinto color según el ejemplo cuya altura es inferior al primero. En la parte superior de la escena

aparece una esfera que indica el punto de luz respecto a la que se va a procesar la misma. Cada ejemplo representa una posible situación que puede aparecer al aplicar el algoritmo a una escena.

- Ejemplo de polígonos iluminados

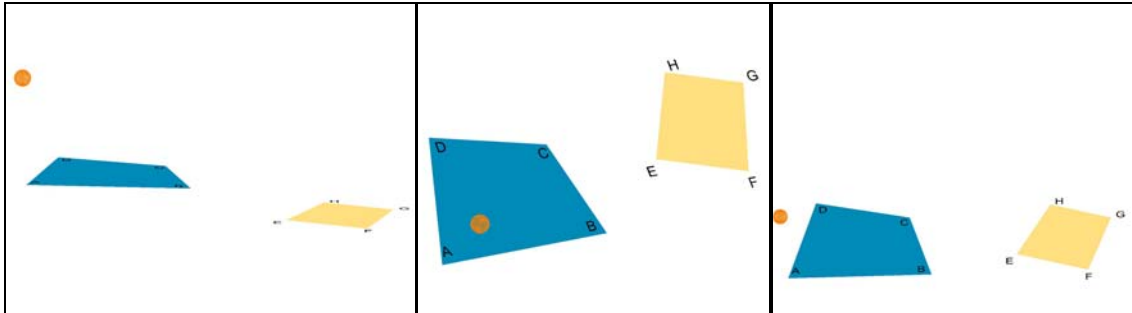


Figura 62: Escena inicial compuesta por dos polígonos planos y una esfera de luz.

El primer paso, como ya se ha descrito en el algoritmo, consiste en generar los planos de sombra del polígono más cercano al punto de luz y añadir estos planos al árbol SVBSP. En la escena que se acaba de mostrar el plano más cercano al punto de luz es el de color azul, definido por sus cuatro vértices A-B-C-D. El primer plano de sombra que se genera es el formado por el punto de luz y los vértices A y B del polígono más cercano.

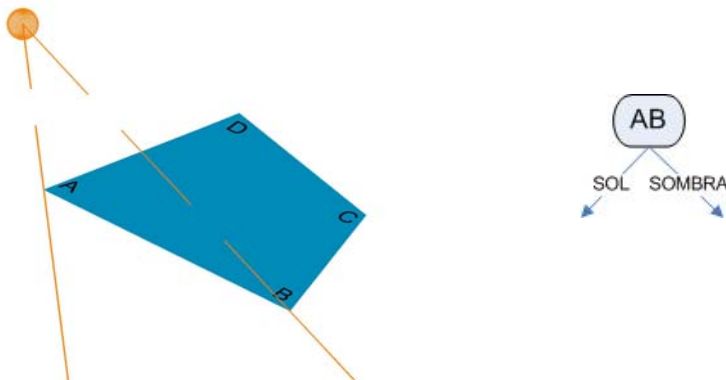
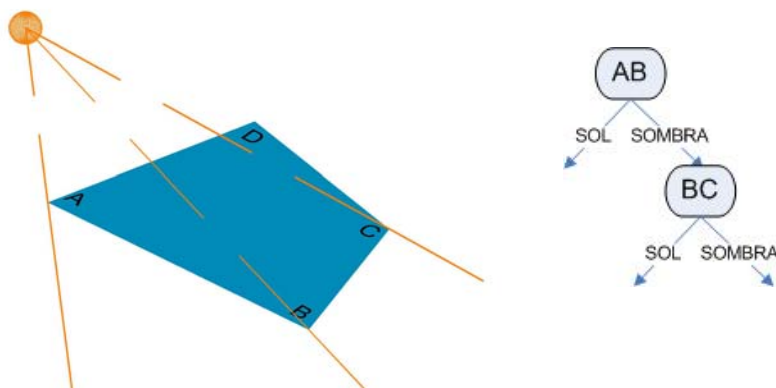


Figura 63: Representación del plano de sombra generado por el eje AB y el punto de luz.

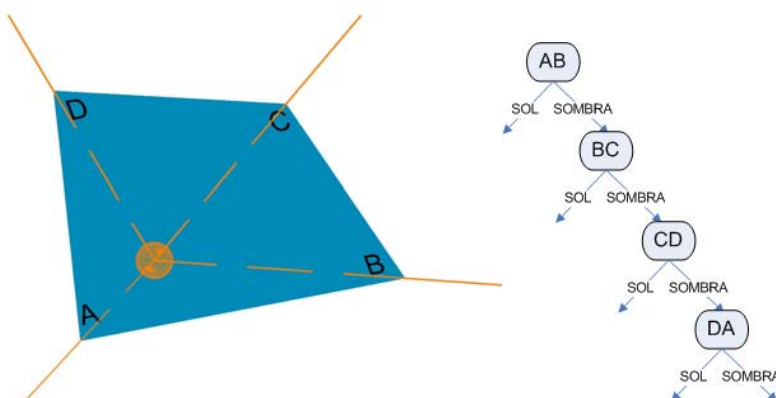
Se inicia el árbol SVBSP con el nodo AB que representa el primer plano de sombra de la escena. Del nodo AB, llamado también nodo raíz por ser el nodo inicial, descienden dos ramas cuyos nombres son Sol y Sombra, las cuales representan los dos subespacios que ha generado el plano, uno de ellos está al sol ya que los elementos que se sitúen en el mismo estarán fuera de la proyección del volumen de sombra del polígono, mientras que por el contrario, los elementos que se sitúen en el otro subespacio puede que sean alcanzados por el volumen de sombra ya que en este subespacio se sitúa el polígono A-B-C-D.

A continuación se añade el plano de sombra que forma la arista BC del polígono con el punto de luz, cuyo nodo se representará con el nombre BC y el cual representa la división de uno de los subespacios anteriores en otros dos subespacios. El siguiente paso consiste en incorporar el plano de sombra que forman el eje BC y el punto de luz e insertarlo en el árbol SVBSP.



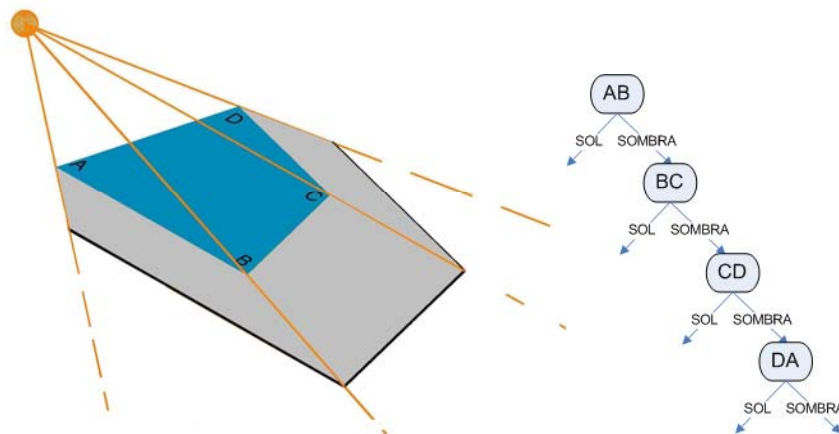
**Figura 64: Creación del plano de sombra BC e incorporación del mismo en el árbol BSP.**

El nuevo plano BC pertenece al subespacio de sombra creado por el primer plano de sombra, por tanto se coloca en el árbol BSP bajo la rama de sombra del nodo AB. El proceso es similar a la creación de un polígono en un árbol BSP. Para terminar de definir el polígono inicial, polígono azul, añadimos los dos planos de sombra que faltan, definidos por las dos aristas que quedan del mismo, para generar la pirámide de sombra del polígono.



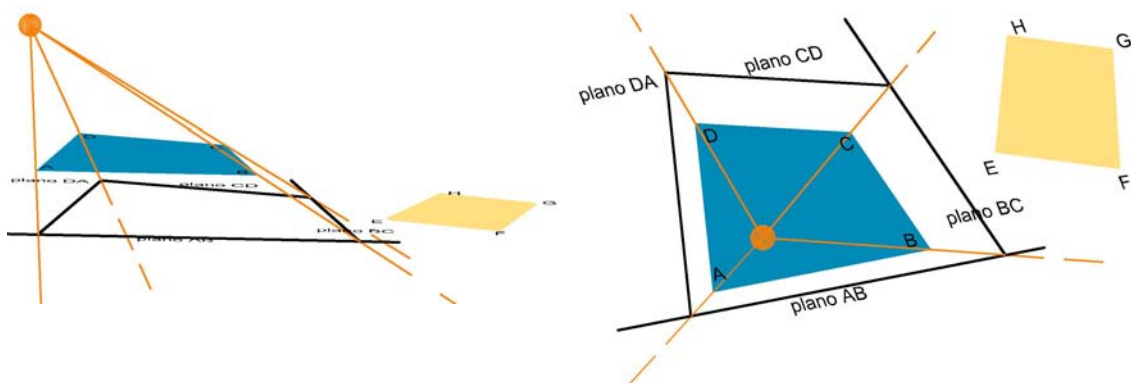
**Figura 65: Representación del primer polígono de la escena en el árbol BSP.**

En este momento queda definir la pirámide de sombra que genera el polígono A-B-C-D, por tanto, es posible conocer si un punto del espacio está en sombra o está iluminado sin más que recorrer el árbol BSP con el mismo y ver en qué hoja termina el punto, en una hoja soleada o una hoja en sombra. El algoritmo se ha definido anteriormente con la función “clasificar\_punto( v, p )”. En la siguiente figura se muestra la pirámide de sombra generada por el polígono A-B-C-D.



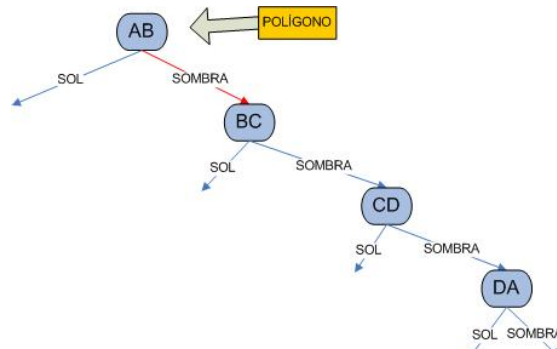
**Figura 66: Representación de la pirámide de sombra del polígono inicial representada en el árbol BSP adjunto.**

El siguiente paso en el algoritmo consiste en incrementar la pirámide de sombra con la incorporación de los siguientes polígonos que forman la escena y que han quedado a la luz. Para el caso que nos ocupa, el siguiente polígono es el formado por los vértices E-F-G-H, el cual aparece en la escena inicial y se incluye en las siguientes figuras.



**Figura 67: Escena inicial con la proyección de los planos de sombra sobre el plano del segundo polígono.**

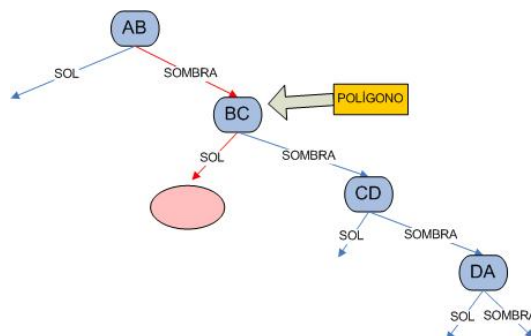
Una vez seleccionado el segundo polígono de la lista, ordenada según la distancia al punto de luz, se procesa el mismo respecto a los planos de sombra del árbol SVBSP. El primer paso de este proceso consiste en ubicar el polígono respecto a los planos de los nodos del árbol. En primer lugar comparamos cada uno de los vértices del segundo polígono con respecto al plano del nodo inicial AB. El resultado de esta comparativa es que todos los puntos del polígono (E-F-G-H) se encuentran en el mismo subespacio generado por el plano, se trata del subespacio de sombra. El algoritmo para determinar la posición de un punto respecto a un plano es el cálculo de la distancia de éste al mismo. En el caso que nos ocupa todos los vértices tienen una distancia distinta, pero con el mismo signo, por tanto todos se encuentran en el mismo subespacio.



**Figura 68: Proceso de clasificación y colocación del polígono E-F-G-H en el árbol SVBSP respecto al nodo AB.**

Por tanto la situación del polígono en el algoritmo es en la rama de sombra del nodo AB, pero como en esta rama ya existe un nodo que es el BC, el siguiente proceso es la comparación del polígono respecto al plano que define este nodo.

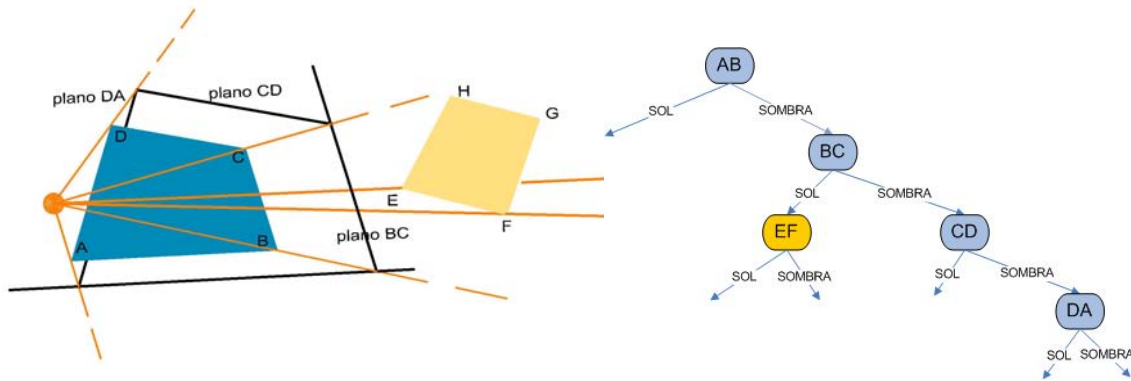
Si se observa la figura anterior de la escena con los dos polígonos y se posiciona el polígono nuevo respecto al plano BC se concluye que el polígono se encuentra en el subespacio definido como soleado del mismo, y como en la rama del nodo BC soleada no existe ningún otro nodo, se puede considerar que el polígono se encuentra entero en este subespacio y formará allí nuevos planos de sombra.



**Figura 69: Proceso de clasificación y colocación del polígono E-F-G-H en el árbol SVBSP respecto al nodo BC.**

El siguiente paso consiste en crear los nuevos planos de sombra y ubicarlos en el árbol ya que estos formarán una nueva pirámide de sombra. En primer lugar creamos el plano de sombra de los vértices E-F del segundo polígono y el punto de luz. Estos tres puntos definen el nuevo plano que se identifica en el árbol SVBSP con el nodo EF y se ubica en la rama soleada del nodo BC, tal como puede apreciarse en la figura de la escena.

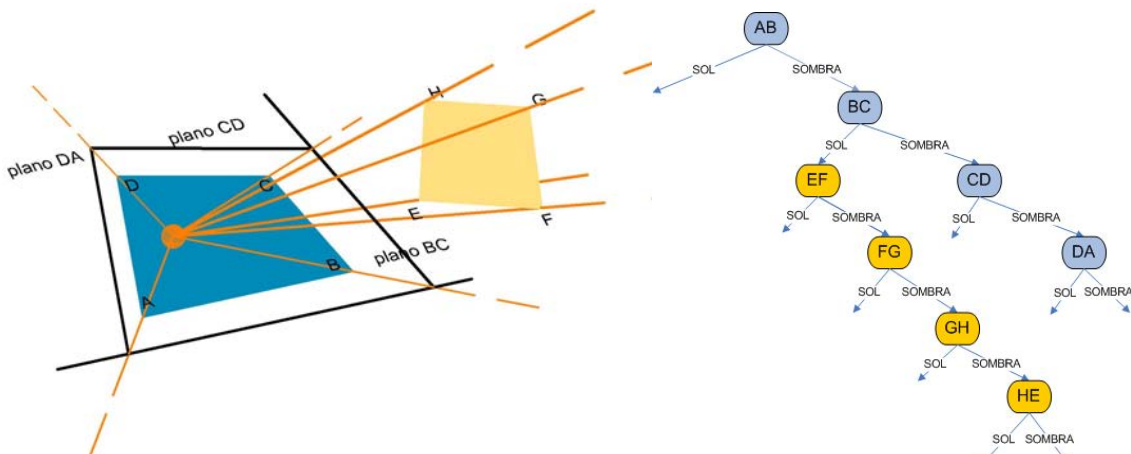




**Figura 70: Creación del nodo EF e inserción del mismo en el árbol SVBSP.**

En color azul se han representado los nodos pertenecientes al polígono superior que lleva el mismo color, mientras que los nodos que aporta el segundo polígono tienen el otro color.

El mismo procedimiento que se ha seguido para la construcción de los planos de sombra del polígono primero se sigue con el segundo, ubicando cada plano de sombra en la posición correspondiente del árbol SVBSP.



**Figura 71: Creación de los planos de sombra del polígono E-F-G-H y ubicación de los mismos en la estructura del árbol SVBSP.**

Los planos siguientes que se han creado, el FG, GH y HE definen el contorno del segundo polígono insertado en la escena y cada uno de ellos se ubica en la rama de sombra del nodo anterior, al igual que pasaba con el polígono primero. Así, se añaden al árbol SVBSP los cuatro planos de sombra del polígono nuevo y queda definido de esta manera el segundo volumen de sombra.

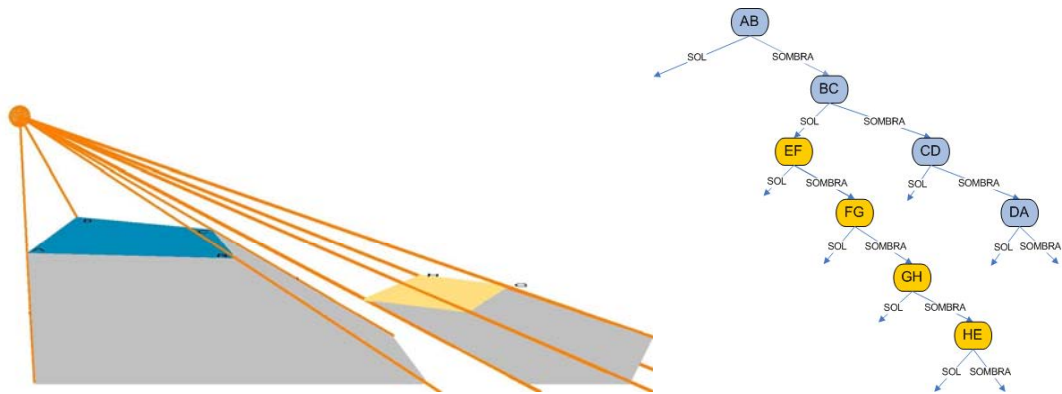


Figura 72: Representación de los volúmenes de sombra sobre la escena y del árbol SVBSP que los representa.

Este procedimiento descrito en este ejemplo es el que se sigue en el caso de encontrar un polígono que está ubicado totalmente en el subespacio iluminado, lo cual se observa al clasificarlo con respecto a algún nodo y observar que se ubica en una rama del mismo iluminada y que no tenía ningún nodo descendiente de la misma, como pasaba en BC.

- Ejemplo de polígonos en sombra

De manera contraria a la situación del ejemplo anterior, ahora se analiza la escena en la que el segundo polígono está totalmente sumergido en el volumen de sombras del polígono primero.

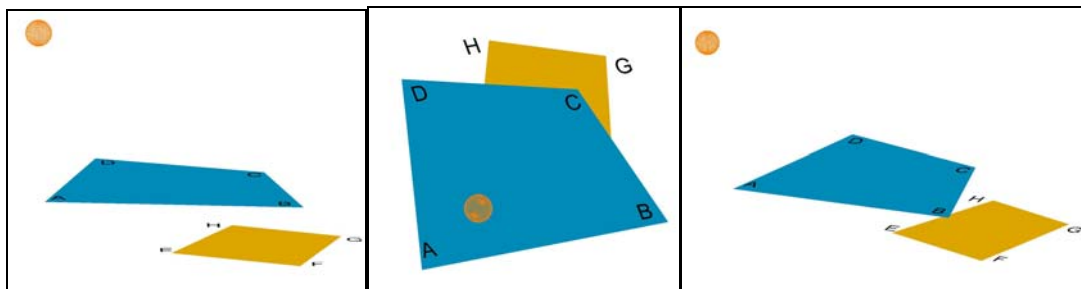
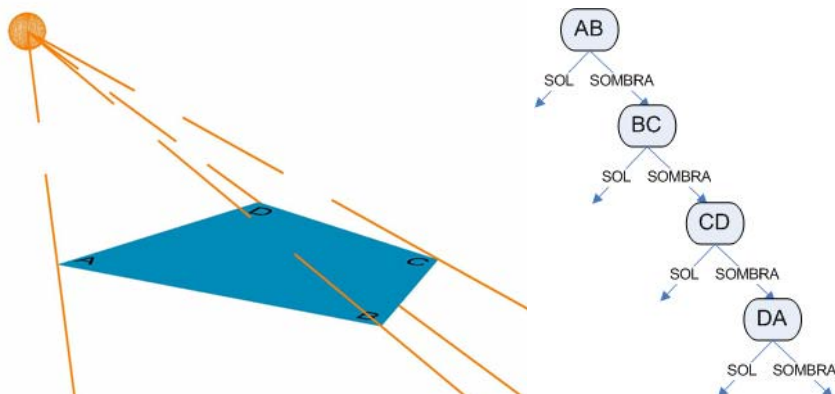


Figura 73: Escena inicial compuesta por dos polígonos planos y una esfera de luz.

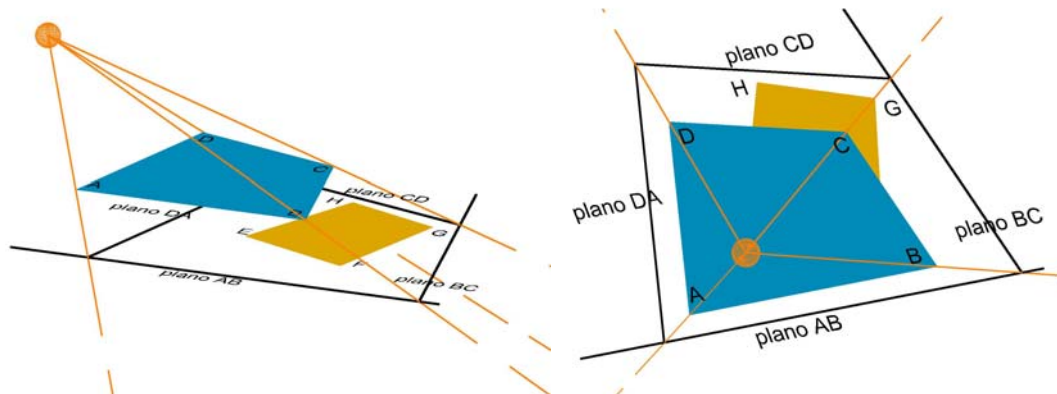
De manera idéntica al ejemplo anterior se procesa primero el polígono más cercano a la luz y se generan los primeros planos de sombra y primeros nodos del árbol SVBSP. Por tanto partimos de la situación que se muestra en la figura en la que ya se ha procesado el primer polígono.



**Figura 74: Inicio de la generación del árbol SVBSP con el primer polígono de la escena.**

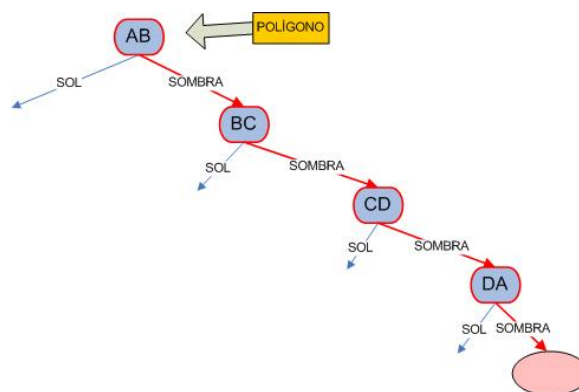
El siguiente paso en el proceso consiste en seleccionar el siguiente polígono de la lista según el orden de cercanía al punto de luz y clasificarlo según los planos de sombra representados en el árbol SVBSP.

Para observar mejor la posición del plano respecto al volumen de sombras generado por el primer polígono se representa en la siguiente figura el corte existente entre los planos de sombra del primer polígono y el plano en el que se sitúa el segundo.



**Figura 75: Representación de los dos planos de la escena y las líneas de corte de los planos de sombra.**

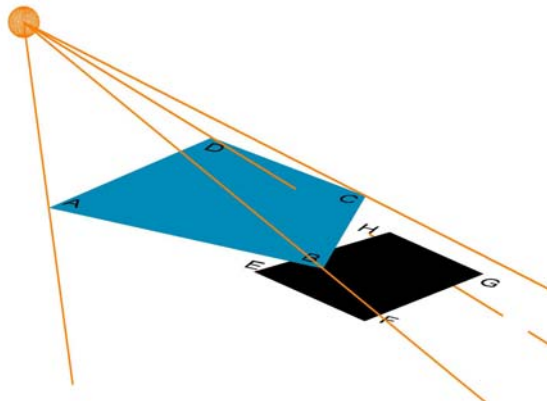
Ahora se trata de ubicar el polígono nuevo respecto a los planos de árbol SVBSP, en primer lugar respecto al nodo raíz AB. En este caso se observa que todos los vértices del polígono E-F-G-H están en el mismo subespacio y se trata del subespacio de sombra del plano AB. En el árbol SVBSP, como ya existe un nodo en esa rama que se ha indicado, se procede a comparar el polígono respecto a este nuevo plano que es el BC. Para este caso, nuevamente todos los vértices están en el mismo subespacio, es decir, el plano de sombra BC no atraviesa el polígono, y este subespacio es el de sombra.



**Figura 76: Representación del proceso de clasificación del polígono dentro del árbol SVBSP.**

Seguimos el proceso de forma análoga, con lo que se compara el polígono respecto al nodo CD, y el polígono sigue en sombra, y respecto al nodo DA, del que también se sitúa en su rama de sombra. Pero finalmente se llega a una rama en sombra que no tiene ningún nodo, que es la rama del nodo DA, lo cual indica que el polígono está entero sumergido en la sombra arrojada por el primer polígono.

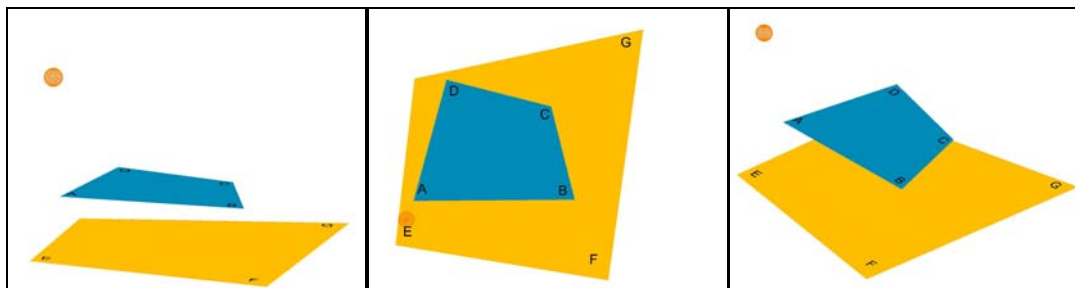
En este caso, el polígono no añade nuevos nodos al árbol ya que no aporta un volumen de sombras distinto a la escena que se está procesando. Con lo que el proceso concluye con la creación de una sombra igual que el segundo polígono.



**Figura 77: Escena final con el segundo polígono dentro del volumen de sombra.**

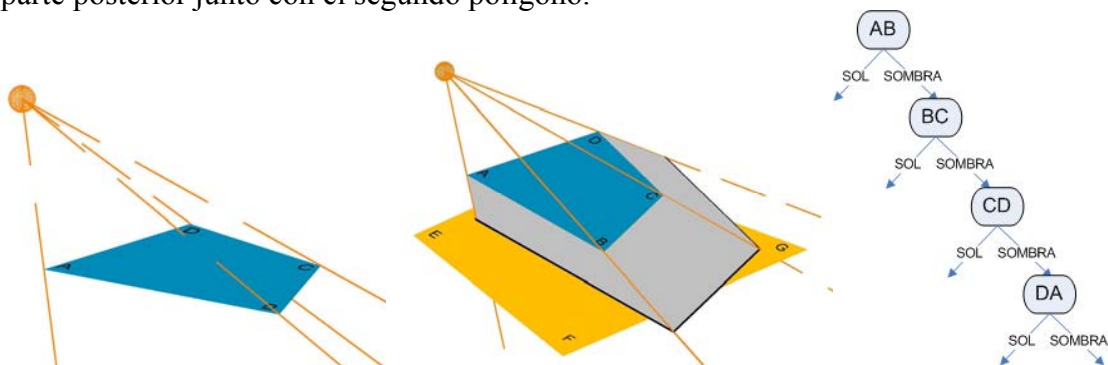
- Ejemplo de polígono sombreado parcialmente

Este ejemplo es el más complejo de los tres ya que en él aparece un polígono que es atravesado por los planos de sombra del otro, proporcionando un perfil de sombra dentro de otro polígono.



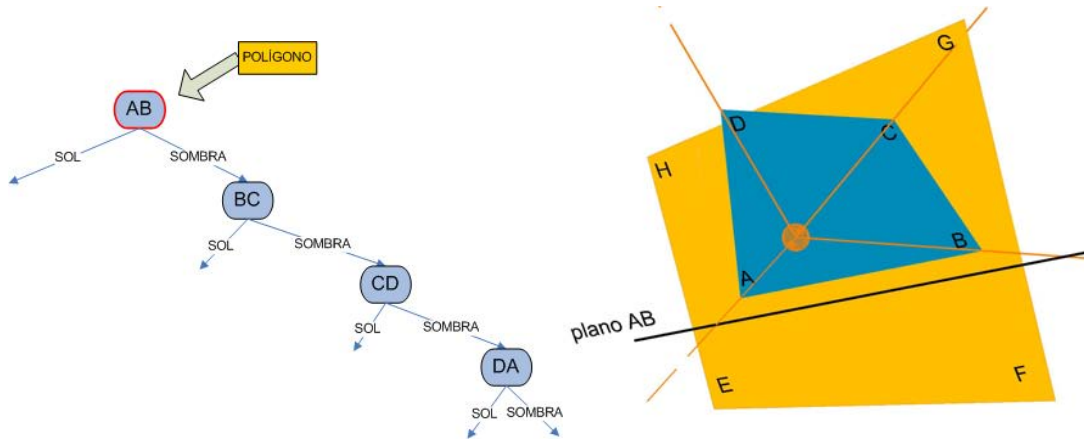
**Figura 78: Escena inicial compuesta por dos polígonos planos y una esfera de luz.**

El polígono azul es común al de los ejemplos anteriores, y como se trata del polígono más cercano a la luz es el primero que se procesa y del que se obtienen los primeros planos de sombra que forman inicialmente el árbol SVBSP. En la figura siguiente se representa el polígono azul y el volumen de sombras que se genera en su parte posterior junto con el segundo polígono.



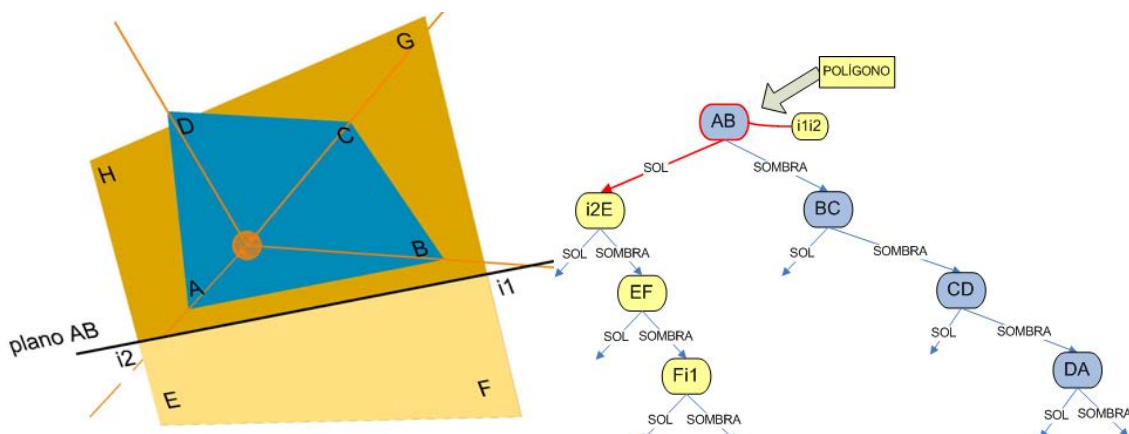
**Figura 79: Representación del primer polígono de la escena y el volumen de sombras que genera el mismo sobre el segundo polígono de la escena.**

Partiendo de esta situación, se trata ahora de incorporar el nuevo polígono de la escena y clasificar su posición respecto al árbol SVBSP del polígono inicial. Para ello se opera igual que en los ejemplos anteriores, en primer lugar se compara la situación del nuevo polígono respecto al nodo raíz AB.



**Figura 80: Clasificación del nuevo polígono respecto al nodo inicial.**

Como se observa en la figura anterior, el plano AB del nodo raíz corta el polígono en dos partes, cada una de ellas pertenece a un subespacio diferente. Por tanto el algoritmo divide el polígono en dos, añadiendo por tanto dos vértices más a la escena,  $i1$  e  $i2$ , fruto de la intersección del plano de sombra AB con el polígono E-F-G-H. El siguiente paso del procedimiento es seguir con la clasificación de los dos polígonos nuevos generados. En primer lugar se clasifica el polígono que está en la parte iluminada, es decir  $i1$ - $i2$ -E-F. Si se observa el árbol SVBSP se comprueba que no existe ningún nodo que descienda de su rama iluminada, “sol”, por lo que el nuevo polígono aporta un nuevo volumen de sombras, definido por sus planos de sombra.

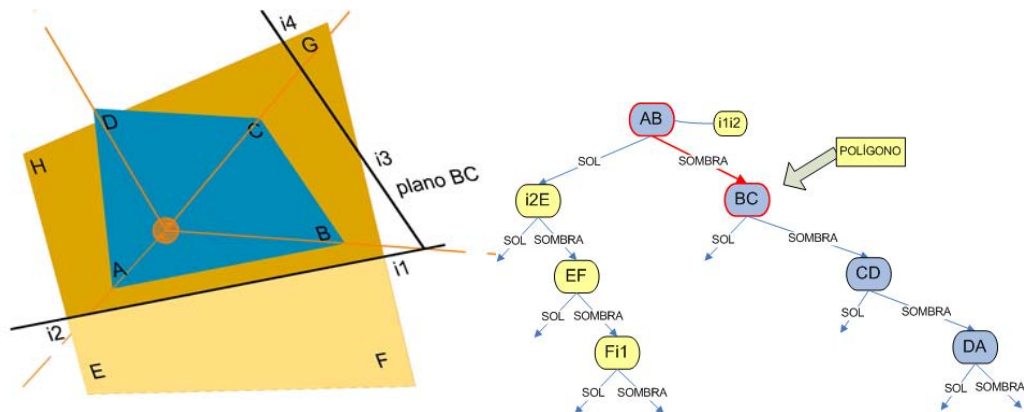


**Figura 81: División del polígono inferior en dos y ubicación del polígono  $i1$ - $i2$ -E-F en el árbol SVBSP.**

El nuevo polígono añade cuatro planos de sombra a la escena, pero uno de ellos ya está definido, es el plano  $i1i2$ , el cual es coplanar al nodo raíz AB, por lo que no se añade ningún nodo nuevo que lo represente. En la figura si que se ha ubicado al lado del nodo raíz para tenerlo en cuenta. En el caso de los demás planos de sombra se procede como en cualquier polígono, aportando así los nodos  $i2E$ , EF y  $Fi1$ .



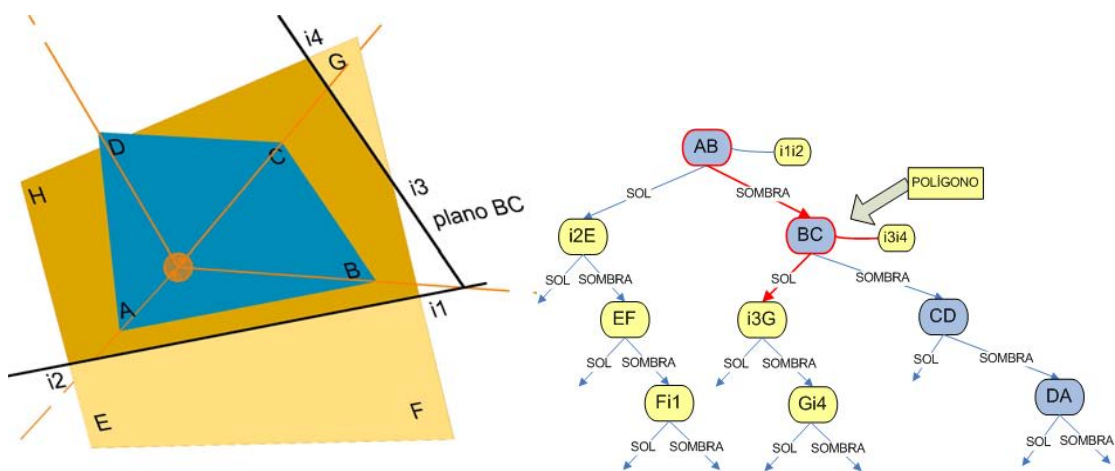
En segundo lugar continuamos con el polígono que ha quedado en el subespacio de sombra del nodo AB, se trata del polígono  $i1-G-H-i2$ . Al clasificar este polígono en el árbol SVBSP se observa que en la rama de sombra ya existe un nodo, el nodo BC, por lo que el siguiente paso del algoritmo es comparar el nuevo polígono con el plano que representa BC.



**Figura 82: Clasificación del polígono  $i1-G-H-i2$  respecto al plano BC.**

Al igual que pasaba en el plano anterior, el nuevo plano BC también corta el polígono  $i1-G-H-i2$  en dos partes, cada una de éstas perteneciente a un subespacio del plano. Los nuevos puntos de intersección tienen los nombres de  $i3$  e  $i4$ . Por un lado queda por tanto, el polígono  $i1-i3-i4-H-i2$  y por otro el definido por los vértices  $i3-G-i4$ . El primero se encuentra en el subespacio de sombra del polígono BC mientras que el segundo en el subespacio iluminado.

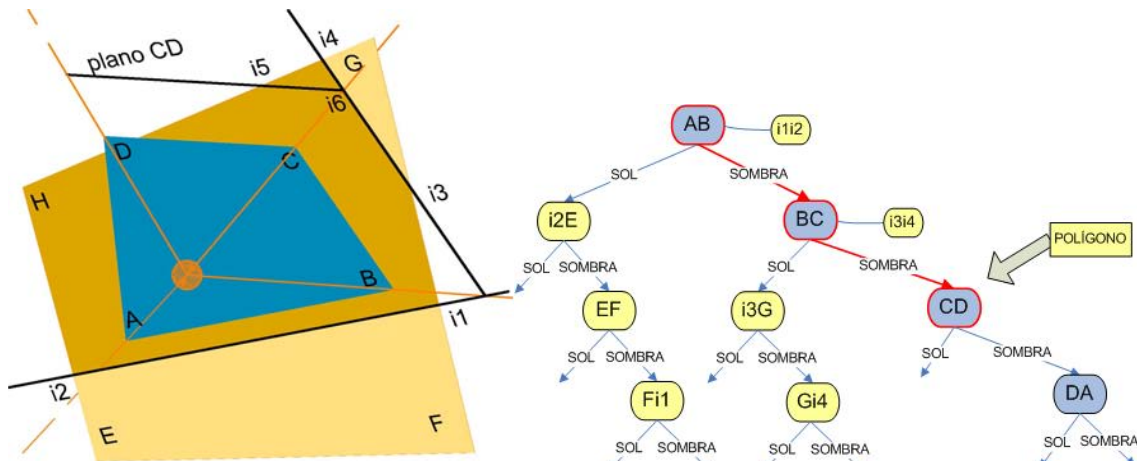
En primer lugar se procesa el polígono  $i3-G-i4$  que es el que queda en el subespacio iluminado, aunque no tiene porque seguirse este orden y se podría procesar primero el otro polígono, pero en este caso vamos a hacerlo de este modo. Así, al comparar el polígono respecto al nodo BC se observa que se encuentra en la rama iluminada, en la que no hay ningún nodo en el árbol SVBSP, por tanto habrá que incluir los nuevos planos de sombra en el mismo.



**Figura 83: División del polígono  $i1-G-H-i2$  en dos polígonos y ubicación del polígono de la parte iluminada en el árbol SVBSP.**

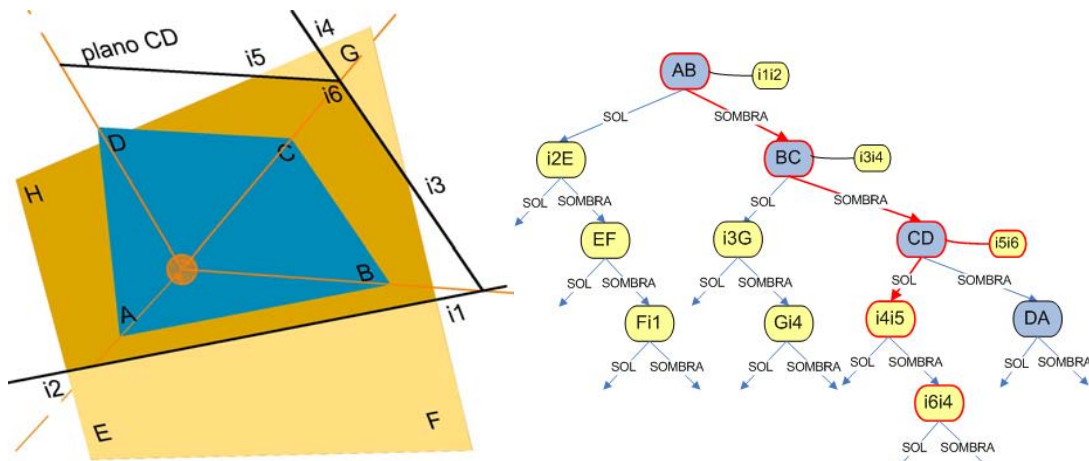
Como se observa en el árbol SVBSP se han incluido dos planos de sombra o nodos nuevos, se trata de los planos  $i3G$  y  $Gi4$ , los cuales incrementan el volumen de sombra de la escena. Por otro lado, existe también el plano  $i3i4$ , pero este es coplanar al plano de corte  $BC$  y por tanto se representa en el mismo nodo que el anterior.

El siguiente paso es continuar con la clasificación del polígono  $i1-i3-i4-H-i2$ , el cual quedaba en el subespacio de sombra generado por el plano del nodo  $BC$ . En la rama de sombra del mismo nodo ya existe otro nodo, el nodo  $CD$ , por tanto el proceso continúa con la misma dinámica anterior. Ahora la clasificación del polígono será respecto al plano  $CD$ .



**Figura 84: Representación del plano de sombras  $CD$  sobre el polígono  $i1-i3-i4-H-i2$ .**

En la figura anterior se representa la intersección del plano  $CD$  sobre el plano del polígono  $i1-i3-i4-H-i2$  y se observa que éste queda dividido en dos polígonos. Los puntos de intersección en este caso son los llamado  $i5$  e  $i6$ . El polígono original vuelve a estar dividido en dos, por tanto una de las divisiones quedará en el subespacio iluminado del nodo,  $i4-i5-i6$ , y otra en el subespacio en sombra,  $i1-i3-i6-i5-H-i2$ .

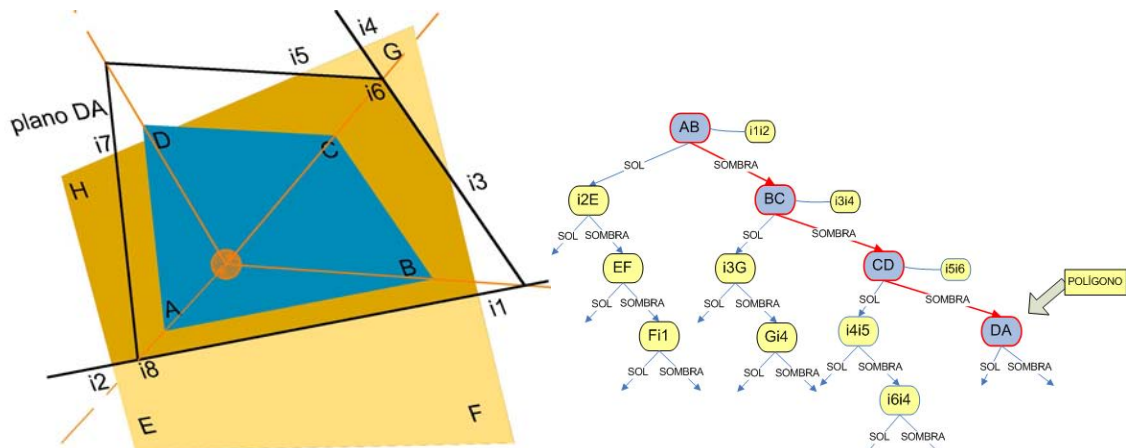


**Figura 85: División del polígono  $i1-i3-i4-H-i2$  y ubicación de los nodos del árbol SVBSP.**

Continúa el proceso igual que lo hacía con las divisiones de los planos anteriores, por tanto, se clasifica primero el polígono  $i4-i5-i6$  que queda en la parte iluminada, y como en esta rama del nodo  $CD$  no existe ningún otro nodo, se le añaden los nuevos planos de sombra al árbol SVBSP. En este caso se añaden solamente los

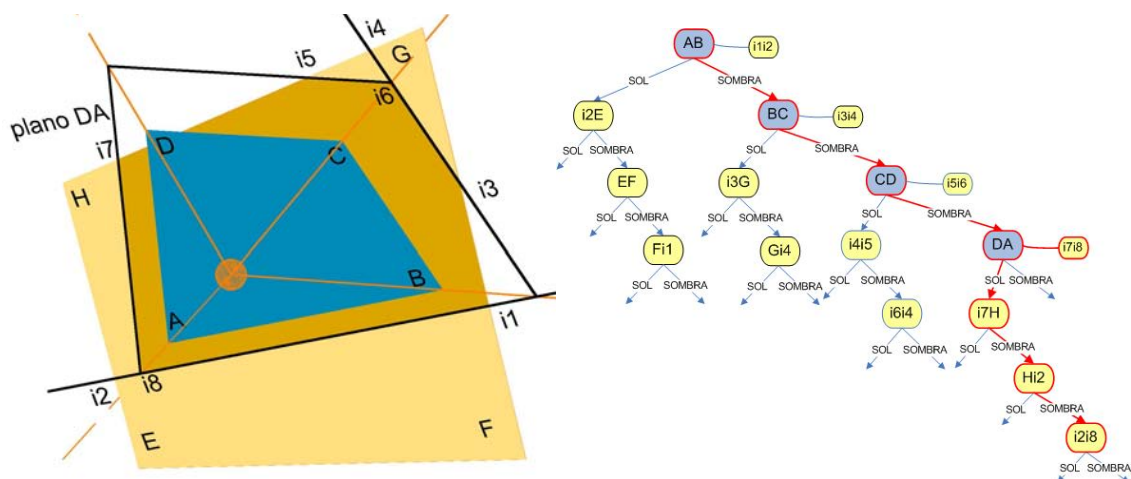
nodos  $i4i5$  e  $i6i4$  ya que el plano  $i5i6$  coincide con el plano de corte CD que se está analizando.

Posteriormente se procesa el polígono restante formado por los vértices  $i1-i3-i6-i5-H-i2$ . Tal y como sucedía en el caso anterior el polígono se sitúa en el subespacio de sombra del plano CD, por lo que deberá clasificarse ahora según el plano del nodo DA, ubicado en esta parte del árbol SVBSP.



**Figura 86: Clasificación del polígono  $i1-i3-i6-i5-H-i2$  respecto al plano DA.**

Como aparece claramente en la figura anterior, el plano de sombra DA también corta al polígono  $i1-i3-i6-i5-H-i2$  en dos partes por los puntos de intersección  $i7$  e  $i8$ . Cada parte se sitúa en un subespacio de los que separa el plano DA. Se procede en primer lugar al análisis del polígono que queda en el subespacio iluminado, se trata del formado por los vértices  $i2-i8-i7-H$ . Bajo el nodo DA no aparece ningún nodo en la parte iluminada, por lo que se procede a añadir los nuevos planos de sombra que forma el polígono.



**Figura 87: Incorporación en el árbol SVBSP el polígono  $i7-H-i2-i8$ .**

Finalmente queda definir la posición del polígono restante  $i8-i1-i3-i6-i5-i7$  el cual queda ubicado en el subespacio de sombra del plano del nodo DA. Si se observa la posición del nodo DA en el árbol SVBSP de la figura se aprecia que no existe ningún nodo en la rama de sombra del mismo, lo cual indica que el polígono resultante se encuentra encerrado dentro de la pirámide de sombra del polígono inicial, con lo que



todo el polígono representa una sombra. El siguiente paso consiste en crear la sombra de la escena.

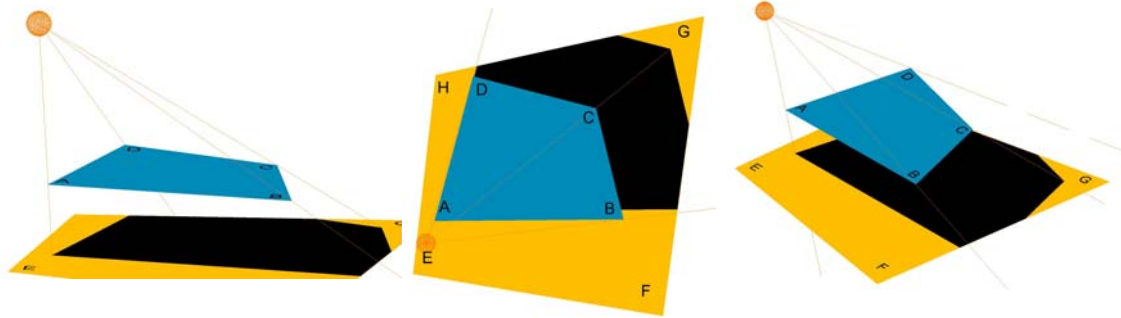


Figura 88: Representación final de la escena con los dos polígonos y la proyección de la sombra de uno sobre otro.

A continuación se representan los dos volúmenes de sombra generados por los polígonos sobre la escena, también se les conoce como pirámides de sombra. A la derecha se observa también el árbol SVBSP final que define la misma.

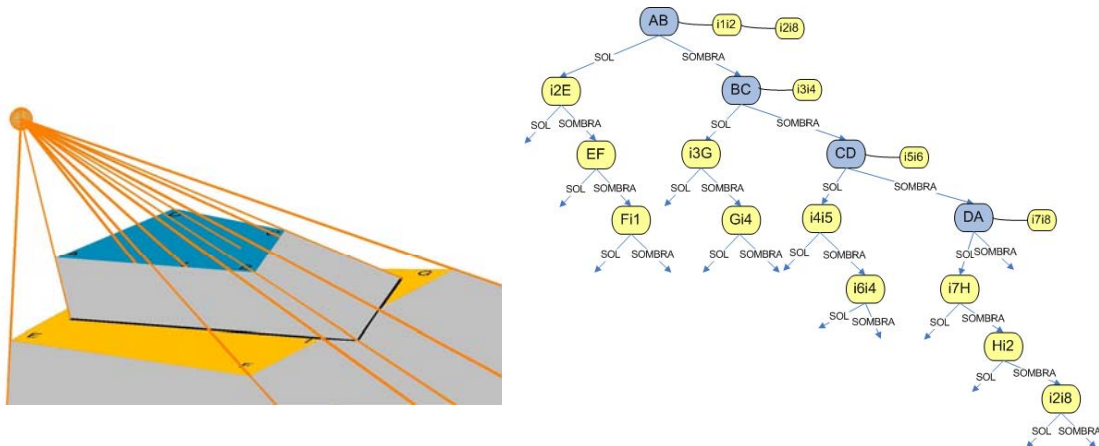


Figura 89: Ilustración de los volúmenes de sombra generados por los polígonos de la escena y el árbol SVBSP que lo representa.

### 3.2.6. VENTAJAS FRENTE OTROS MÉTODOS

Frente al ray-tracing, (generar rayos alrededor ) éste método (BSP) estructura la escena previamente en forma de árbol binario, lo cuál implica que se ahorra mucho tiempo en la generación de los polígonos de sombra, ya que los que están en sombra ya no se estudian y en el ray-tracing no (se puede aplicar esta mejora también).

## 3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO SVBSP TREES A UN ENTORNO CAD

A continuación se describe el proceso que se ha adoptado para adaptar el método SVBSP al cálculo de sombras en un entorno CAD. El método SVBSP ha sido implementado en lenguaje C++ por Mel Slater en una librería que lleva el nombre SVBSP. La librería está compuesta por una serie de archivos específicamente creados para almacenar objetos necesarios en la generación de sombras.

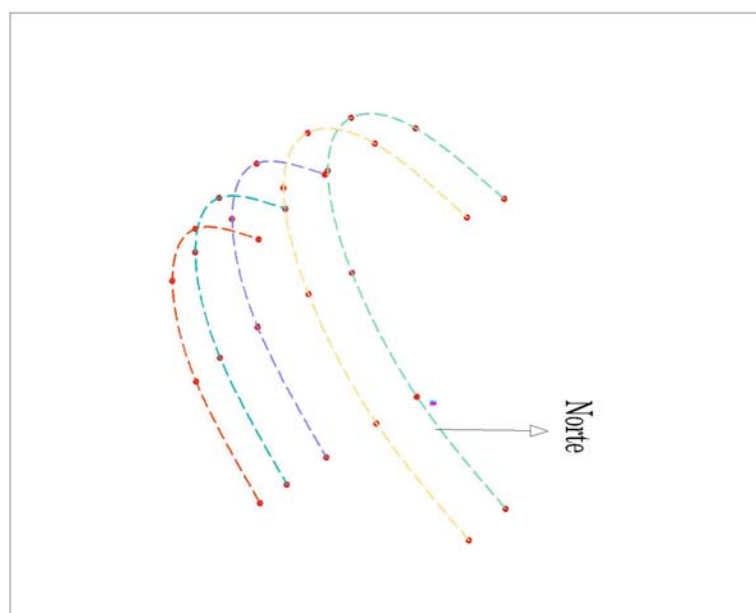
Archivo	Definición
tree.h	Contiene la clase que define los nodos del árbol BSP y sus funciones.
tree.c	
face.h	Define distintas clases de la librería: face,*facePtr, liteFace, *liteFacePtr, Facelist y LiteFaceList. Además define distintas macros del programa.
face.c	
view.h	Contiene la clase Light que define el punto que representa la luz (la posición del sol en la escena).
view.c	
polygon.h	En estos archivos se define la clase polygon que tiene una función similar a la clase face pero contiene más funciones geométricas para realizar cálculos de intersección de polígonos y operaciones booleanas entre ellos.
polygon.c	
vertex.h	Contiene funciones para definir los vértices.
vertex.c	
index.h	La librería utiliza los objetos index para marcar la posición de un vértice dentro de la lista de vértices de la escena.
index.c	

**Tabla 1: Archivos de la librería SVBSP y su función en el programa.**

El procedimiento que se sigue para la generación de los polígonos de sombra de la escena mediante el uso de la librería SVBSP se describe en los siguientes pasos:

### 3.3.1. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE LUZ DE LA ESCENA

En primer lugar se especifican las coordenadas del punto de luz de la escena, la librería está pensada para que puedan existir distintos puntos de luz simultáneamente actuando sobre la escena. Además permite que a cada punto lumínico se le asigne unos parámetros de color de la luz de manera que se puedan calcular zonas de mezcla de luz debido a dos luminarias. El interés de los programas de simulación es el cálculo de radiación, por tanto, para la aplicación en estos programas el punto de luz representa el sol, por lo que éste irá variando a lo largo del proceso de simulación.



**Figura 90: Posiciones solares de análisis en la aplicación.**

### 3.3.2. GENERACIÓN DEL LISTADO DE CARAS

El siguiente paso consiste en la generación del listado de caras (polígonos de la escena) y vértices de las mismas. El siguiente paso consiste en generar una escena de polígonos que se vaya a analizar, como en los ejemplos anteriores. La escena inicial estará formada por los polígonos que forman la envolvente del edificio que se quiere analizar. Además habrá que incluir en forma de polígonos los distintos elementos que forman el contorno del edificio. Para ello hay que convertir las polilíneas del programa CAD en polígonos que reconozca la estructura de objetos que forman la librería.

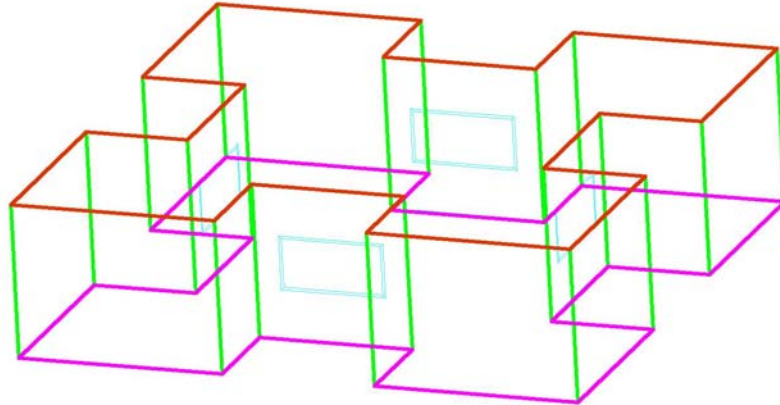


Figura 91: Polígonos que representan el contorno del edificio en CAD

### 3.3.3. CREACIÓN DE LOS POLÍGONOS DE SOMBRA

Creación de los nuevos polígonos que forman las sombras sobre los polígonos de escena anteriores. Con la información de los apartados anteriores se crea un árbol SVBSP y junto con él los nuevos polígonos de sombra que aparecen en la escena. Los polígonos de sombra se asocian al polígono sobre el que se proyectan, de esta manera resulta sencillo calcular la fracción de polígono que se sitúa al sol y a la sombra.

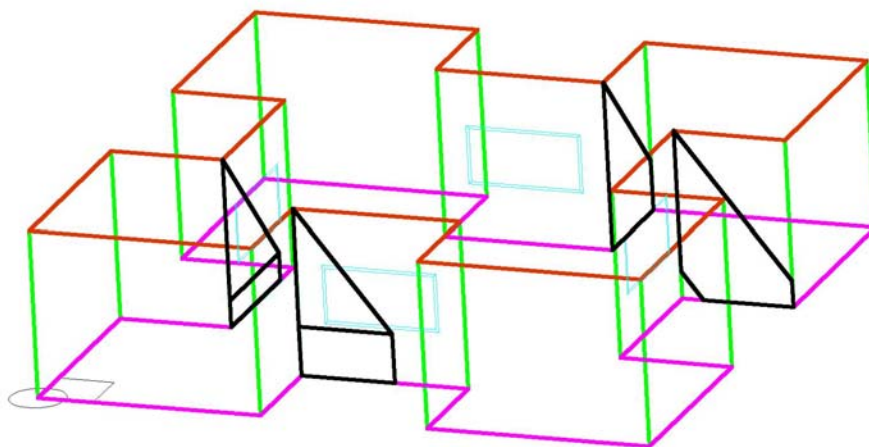


Figura 92: Representación de los polígonos del contorno y los polígonos de sombra sobre los mismos.

El entorno CAD facilita la labor de creación de los polígonos de la escena ya que se trata de dibujo vectorial, formado por distintos objetos ubicados en el sistema de referencia. De esta manera se puede extraer la información geométrica del edificio interpretando los archivos DXF y añadir de la misma manera nuevos elementos calculados fuera del entorno CAD como son los polígonos de sombra.

### **3.3.4. ESQUEMA RESUMEN DEL PROCESO**

En la siguiente figura se muestran los pasos que se siguen para la obtención de los polígonos de sombra de una escena generada con los polígonos que forman la envolvente de un edificio. Se distinguen tres fases en el proceso, cada una de ellas representada con unos bloques de color distinto.

La primera de ellas describe los pasos a seguir en la aplicación CAD para generar la escena con los polígonos que representan la envolvente del edificio. En esta primera etapa se emplea una macro CAD\_vpCLIMA encargada de extruir la información de los planos en 2D para generar un volumen que represente las verdaderas formas y dimensiones de los elementos arquitectónicos que forman el edificio, interpretando y construyendo lo que son cerramientos exteriores, interiores, en contacto con el terreno, suelos y techos exteriores e interiores, ventanas, etc.

La siguiente fase se realiza en un programa independiente, el cual se llama desde el programa CAD para su ejecución. La función de este programa es leer un archivo en formato dxf y generar otro archivo con la misma información y con los polígonos de sombra calculados. Para ello se necesitan varios pasos, en primer lugar hay que filtrar la información del dxf, de manera que sólo se trabaja con las entidades que representan la envolvente del edificio. Con esta información se genera una escena de polígonos utilizando la librería SVBSP, para la cual se utilizan los objetos “face”. El programa genera con los polígonos de la escena un árbol SVBSP y del mismo crea los polígonos que representan las sombras de la escena. El paso siguiente es convertir las sombras en objetos LWPolyline para incorporarlos en el nuevo archivo dxf de salida.

La tercera y última fase tiene lugar en el programa vpCLIMA. El programa lee el archivo dxf con la información de las sombras incluida para cada elemento y a la hora de ejecutar la simulación la interpreta. De manera que la información de las sombras está precalculada en la simulación y el proceso es más rápido.

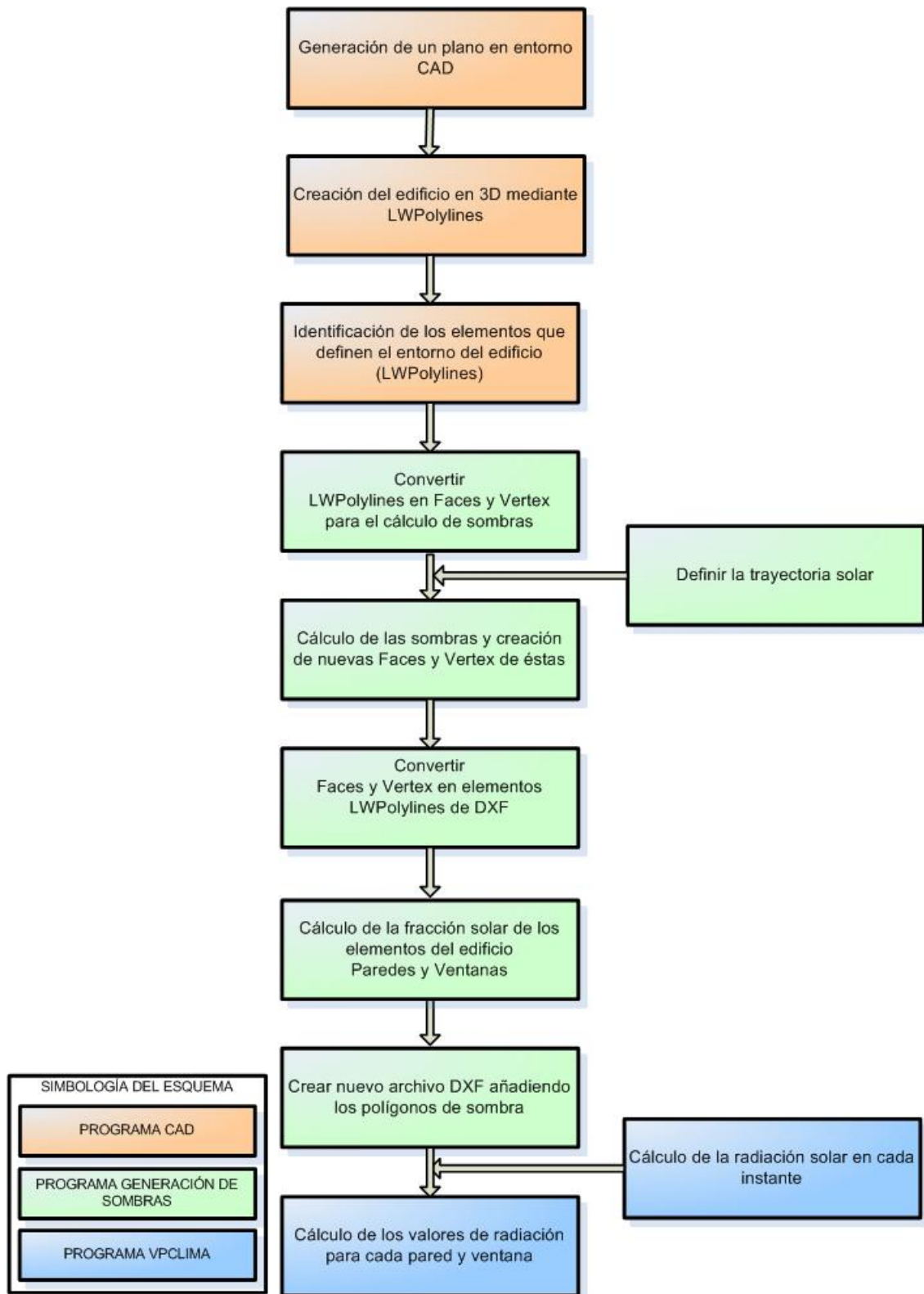


Figura 93: Esquema proceso cálculo de sombras con librería SVBSP Tree.

### 3.4. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

Ref. 11

Wanger,L.(1992) “The effect of Shadow quality on the perception of spatial relationships in Computer Generated Imagery”. SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics, 39-42.

Ref. 12

Crow,F. (1997) “Shadow algorithms for computer graphics”, Computer Graphics11(2) 242-247.

Ref. 13

Bergon, P.(1986) “A general version of Crow’s Shadow Volumes”, IEEE CG&A, 6(9),17-28.

Ref. 14

Woo, A., Poulin, P., Fourier, A. (1990) “A survey of Shadow Algorithms”, IEEE CG&A, 10(6),13-31.

Ref. 15

Williams,L. (1978) “Casting curved shadows on curved surfaces”. Computer Graphics, 12(8), 270-274.

Ref. 16

Fuchs, H., Kedem, Z.M., Naylor, B.F. (1980) “On visible surface generation by a priori tree structures” , Computer Graphics 14(3), 124-133.

Ref. 17

Thibault, W.C., Naylor, B.G.(1987) “Set operations on polyhedra using binary space partitioning trees”, Computer Graphics, 21(4),153-162.

Ref. 18

Chin, N., Feiner, S. (1989) “Near real-time shadow generation using BSP trees”, Computer Graphics 23(3),99-106.

Ref. 19

Batagelo, H.C., Costa, I., Jr., (1999) “Real-time shadow generation using BSP trees and Stencil Buffers” Computer Graphics and Image Processing . Campinas, Brazil 93 – 102.

Ref. 20

Chrysanthou,Y., Slater, M. (1995) “Shadow volume BSP trees for computation of shadows in dynamic scenes”. Symposium on Interactive 3D Graphics. Monterey, California, United States. 45 - 50 .

## **4. APLICACIÓN SOBRE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN TÉRMICA**

El procedimiento a seguir es en primer lugar estudiar los planos que describen el edificio y observar las distintas zonas y locales que lo componen y de las que vamos a regenerar su contorno. Hay que tener en cuenta que la finalidad del procedimiento es generar un modelo geométrico en tres dimensiones para una simulación térmica del mismo, por lo que no es necesario un nivel de detalle muy preciso en cuanto a la definición del contorno de los espacios, ya que esto no va a variar mucho el volumen y área total del espacio o local que definamos.

La metodología más práctica para la introducción de los datos geométricos del edificio en una aplicación térmica es una herramienta CAD, por varios motivos:

- Son aplicaciones muy extendidas y conocidas por arquitectos e ingenieros.
- La geometría del edificio suele definirse en este tipo de aplicaciones, por tanto, una vez introducida se aprovecha y no se tiene que volver a generar para otras aplicaciones.
- El formato DXF con el que trabajan estas aplicaciones es un formato de intercambio de información que está adaptado para importar tanto información geométrica como no geométrica.

La implementación del método Shadow Volumes sobre un archivo CAD requiere seguir una serie de pasos para adaptar la información del archivo DXF de la aplicación con la información de la librería C++ donde se programa el algoritmo de cálculo de sombras. En este capítulo se detallan los pasos seguidos así como la gestión de la información obtenida con el análisis para su posterior uso en el cálculo energético.

En primer lugar se genera una escena de polígonos en la que se procesa el análisis de las sombras. Los datos de sombreado de cada polígono se almacenan en el mismo, utilizando datos extendidos en el archivo DXF, para el posterior cálculo energético del edificio. Los datos que se almacenan para cada elemento es la fracción sombreada de cada elemento en cada instante.

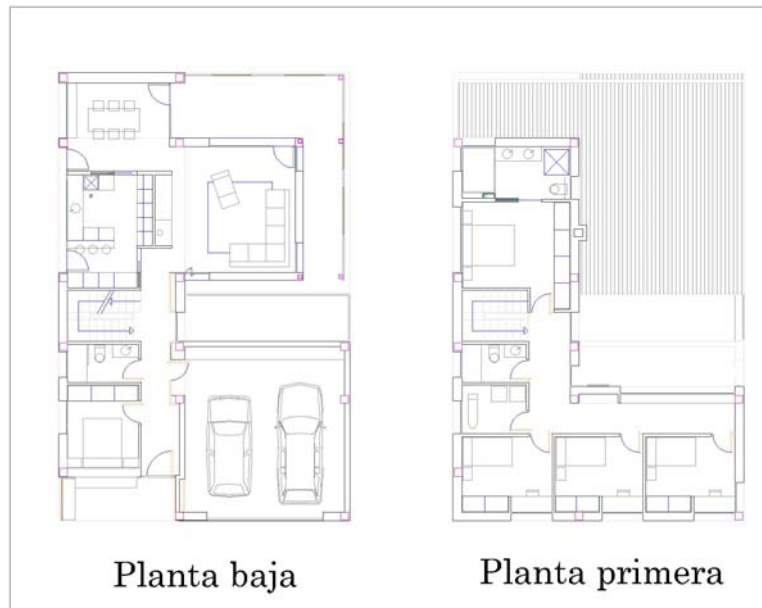
### **4.1. GENERACIÓN DE LOS POLÍGONOS DE ESCENA**

#### **4.1.1. GENERACIÓN DEL CONTORNO**

El primer paso consiste en la generación de una serie de polígonos que representen la envolvente y el entorno del edificio. Para ello se aprovecha la información del mismo que ha generado el arquitecto en los planos CAD. Este proceso es el que se sigue para la introducción de información en la nueva aplicación vpCLIMA para el cálculo de cargas y demanda del edificio.

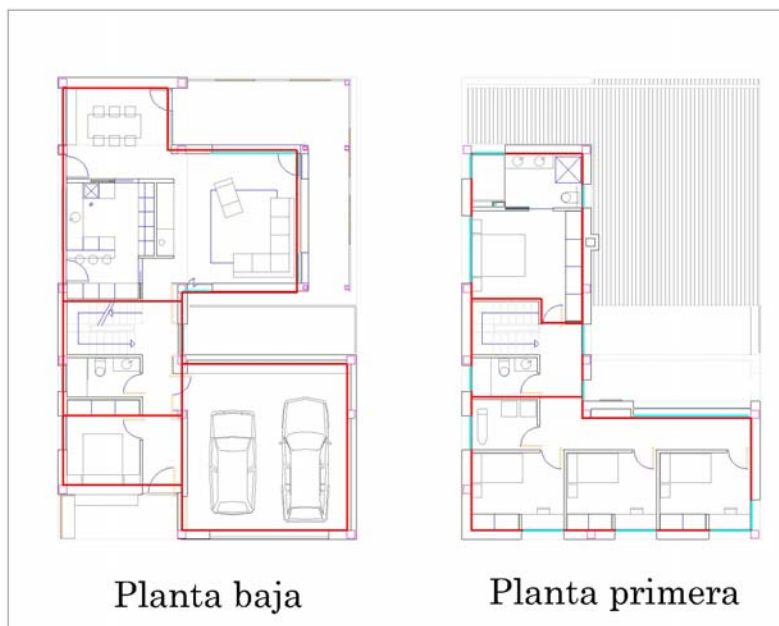
La información de partida es por tanto la geometría dibujada en CAD por el arquitecto, tal y como se representa en la figura siguiente, la cual contiene multitud de

capas para definir distintos tipos de elementos. De entre todas las capas del documento se filtran y dejan visibles aquellas que nos muestran el controno del edificio.



**Figura 94: Planos de partida del edificio.**

Una vez observada la estructura del edificio se dividen las tareas para trabajar por separado cada una de las distintas plantas que lo conforman. El procedimiento consiste en generar unos contornos cerrados que integren lo que representarán los locales para la simulación energética. En el caso de utilizar la herramienta AutoCAD se trata de generar unas polilíneas cerradas en una capa de nombre LIDER las cuales se pueden observar en la siguiente figura de color rojo. Se ha escogido el nombre de capa LIDER porque el mismo procedimiento se utiliza para introducir la geometría en el programa LIDER que la administración ha desarrollado para el cumplimiento del apartado de Ahorro Energético(HE-1) del Código Técnico de la Edificación.

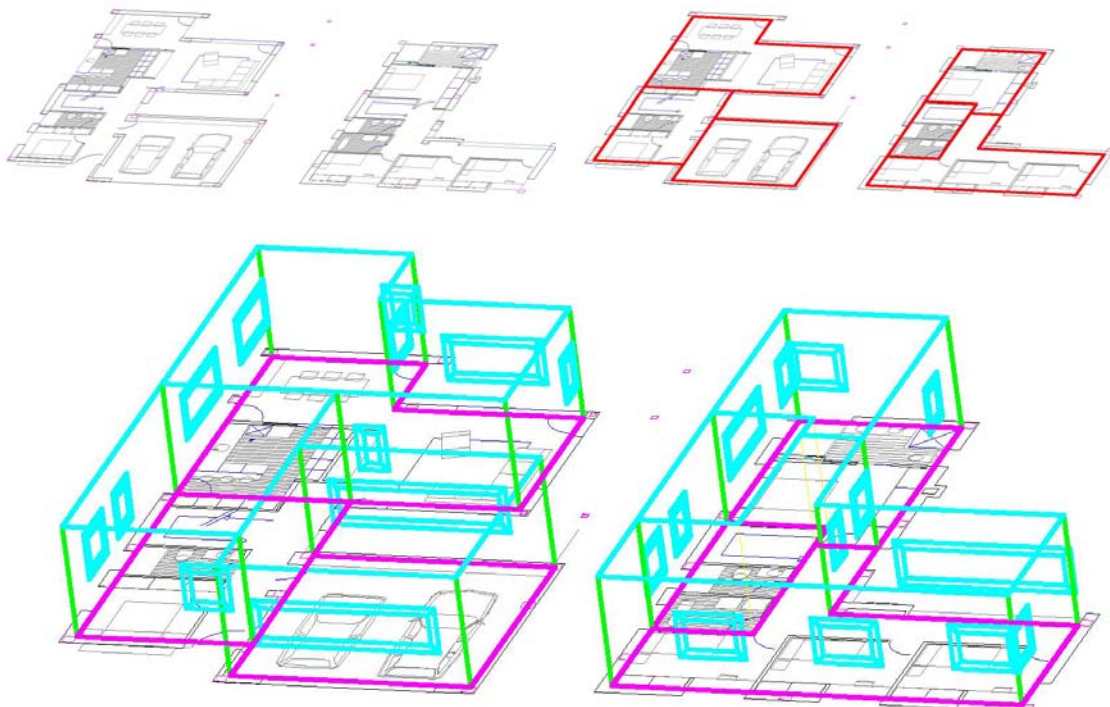


**Figura 95: representación de los distintos contornos térmicos de cada una de las plantas que conforman el edificio.**



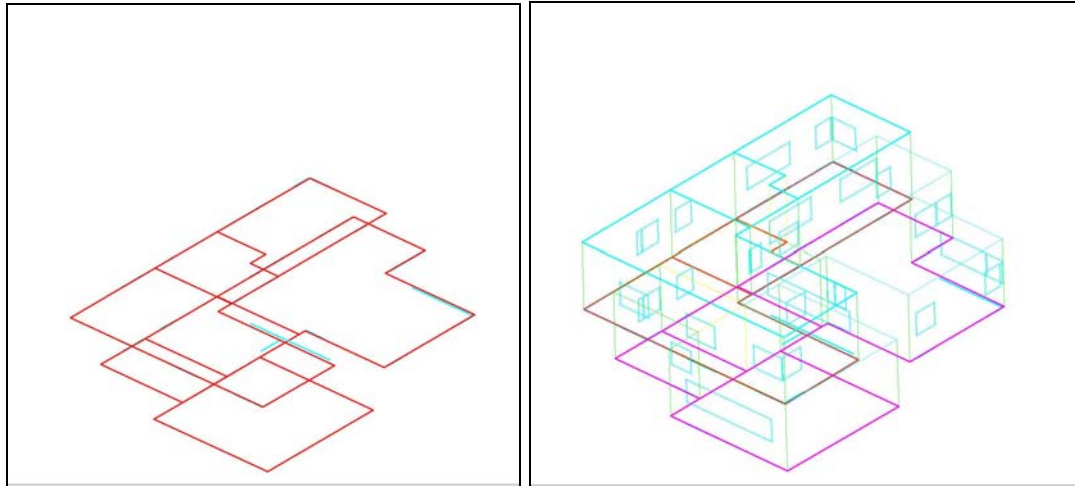
En la figura anterior se aprecia el contorno de los espacios de la vivienda definidos mediante polilíneas de color rojo. Con esta simple acción el programa interpretará la posición de cada uno de los elementos que forman la estructura del edificio asignándole la función arquitectónica que tiene cada uno, así como composiciones y distribuciones por defecto para los mismos. Las líneas de color azul simbolizan las ventanas del edificio. Para crearlas se utilizan líneas en lugar de polilíneas como se hacía en los espacios.

El siguiente paso consiste en ejecutar la macro creada en AutoCAD y programada en Visual Basic para aplicaciones (VBA). La macro reconoce los recintos creados (LWPolylines en la capa LIDER) y extruye las polilíneas en altura (eje Z del documento CAD) interpretando la información y creando un modelo completo de geometría necesario para simular el edificio.



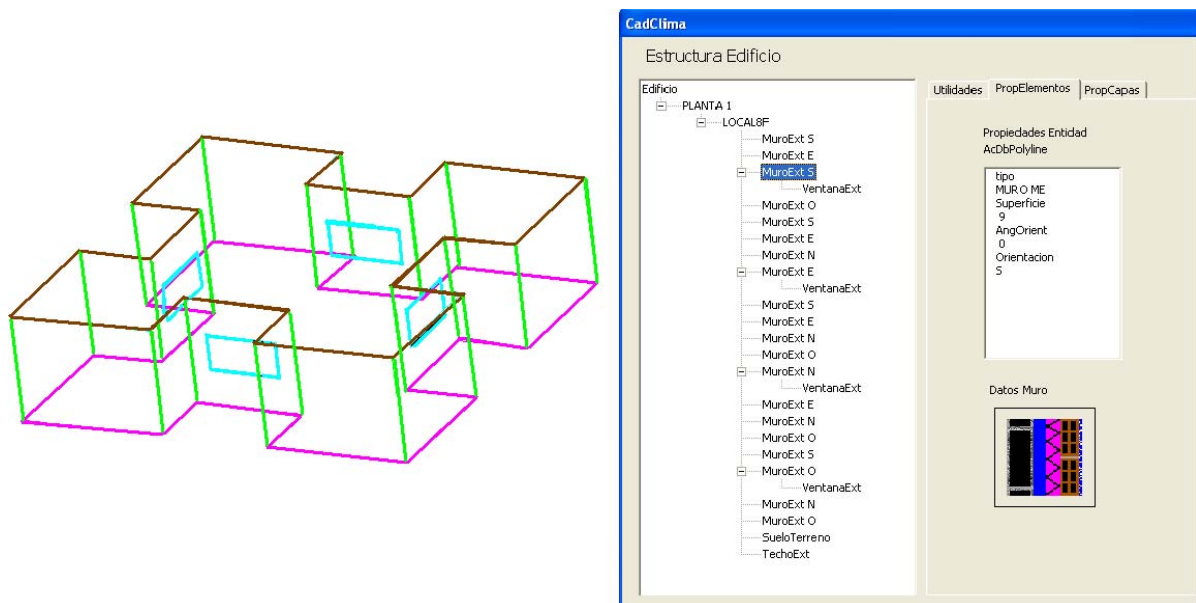
**Figura 96: Modelo geométrico del edificio que se empleará en la simulación.**

En el ejemplo de la figura anterior se han construido las dos plantas separadas para poder distinguirlas claramente. En el procedimiento real, cuando se crean los contornos de las plantas, éstas deben colocarse en la posición y cota correspondiente, para poder generar la estructura real del edificio, con sus interacciones entre plantas, como se observa en las figuras siguientes.



**Figura 97: Colocación de las plantas en posición y cota correspondiente y representación 3D del edificio.**

Mediante la macro programada en AutoCAD se construye el edificio en tres dimensiones y además se interpretan los elementos creados y se construye un árbol con la jerarquía del mismo, donde el nodo raíz es el edificio y de éste descenden las plantas, locales, cerramientos y huecos del edificio. Éste árbol jerárquico es el mismo que aparece después cuando se exporta la información al programa vpCLIMA.



**Figura 98: Edificio en CAD y representación en forma de árbol en la macro de VBA.**

El proceso de construcción geométrica del edificio no es una cuestión baladí, en él se distinguen varios procedimientos y algunos de ellos, como es el proceso de unión y separación de polígonos entrañan dificultades debidas al truncamiento de los valores que representan las coordenadas de los vértices de los polígonos en las herramientas CAD como AutoCAD.

#### 4.1.2. GENERACIÓN DE LAS CAPAS DEL DOCUMENTO

Al generar el edificio se crean también una serie de capas en las que se colocan las entidades de nueva creación. Las capas en el programa CAD indican la función arquitectónica que tiene un determinado elemento. A continuación se comentan las nuevas capas que se crean y el tipo de elemento que representan cada uno.

Grupo	Nombre de la capa	Elemento que representa
Capas de programa	LIDER	Capa para generar el contorno de los espacios
	V_LIDER	Capa para generar los huecos de la envolvente
	ESQUELETO	Capa auxiliar para ayudar en el manejo
	SOMBRAS_VPCLIMA	Edificios o elementos colindantes exteriores al edificio
Capas de muros	ME_VPCLIMA	Muro exterior
	MI_VPCLIMA	Muro interior
	MO_VPCLIMA	Muro en contacto con otro local fuera proyecto
	MT_VPCLIMA	Muro al terreno
Capas de techos	TE_VPCLIMA	Techo exterior
	TI_VPCLIMA	Techo interior
	TO_VPCLIMA	Techo en contacto con local fuera proyecto
	TT_VPCLIMA	Techo al terreno o azotea ajardinada
Capas de suelos	SE_VPCLIMA	Suelo exterior
	SI_VPCLIMA	Suelo interior
	SO_VPCLIMA	Suelo en contacto con local fuera proyecto o vacío sanitario
	ST_VPCLIMA	Suelo al terreno

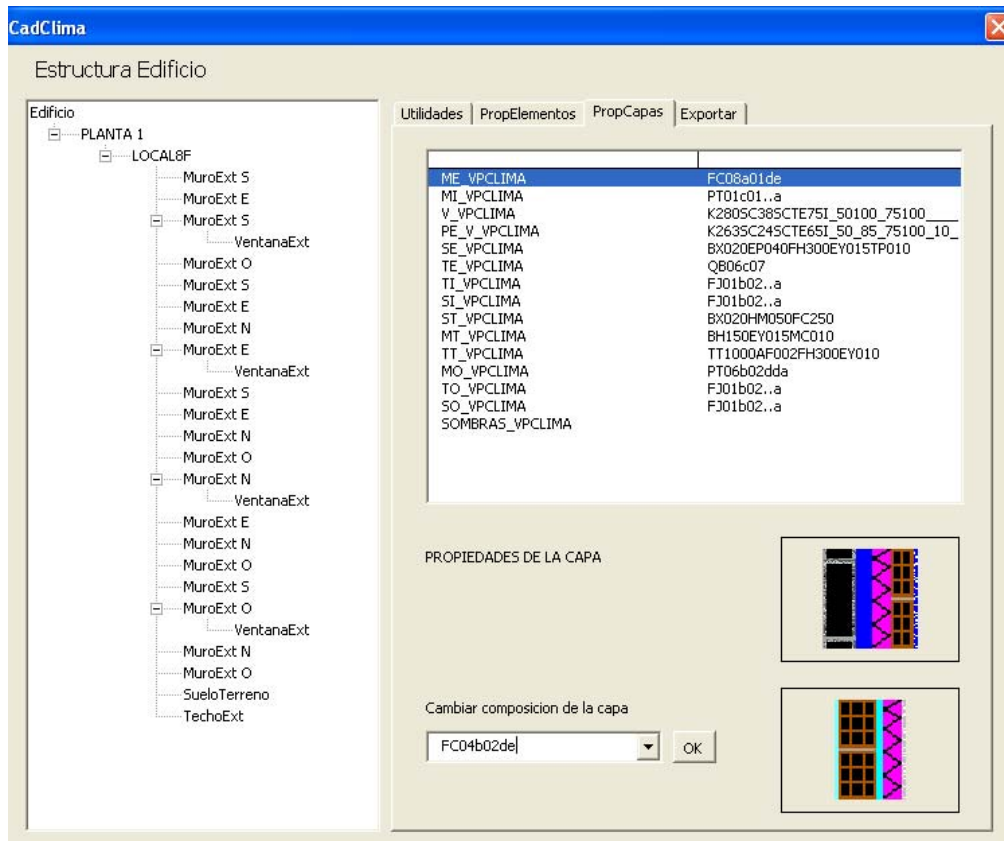
**Tabla 2: Capas del programa y elementos que representan.**

Además de representar un tipo de elemento arquitectónico, muro exterior, muro interior, etc., la capa también engloba una composición constructiva determinada para cada tipo. Por defecto el programa tiene asignada una composición para cada tipo de elemento, por tanto, las capas anteriormente nombradas representan la definición constructiva utilizada por defecto para cada uno de los materiales que representan.

Pero en un mismo edificio pueden existir elementos que tienen la misma función pero distinta composición, para ello el usuario debe crear una nueva capa y asignar a la misma una composición de la base de datos del programa. La nueva capa debe contener al final de su nombre la terminación del tipo de elemento arquitectónico que va a representar. Así, para asignar una nueva composición distinta de la de defecto a un muro exterior habrá que crear una nueva capa con un sufijo y la cadena final ME\_VPCLIMA,

por ejemplo, “nuevaME\_VPCLIMA”. Para asignar esta nueva propiedad un elemento concreto de la escena se selecciona el mismo y se coloca en la nueva capa.

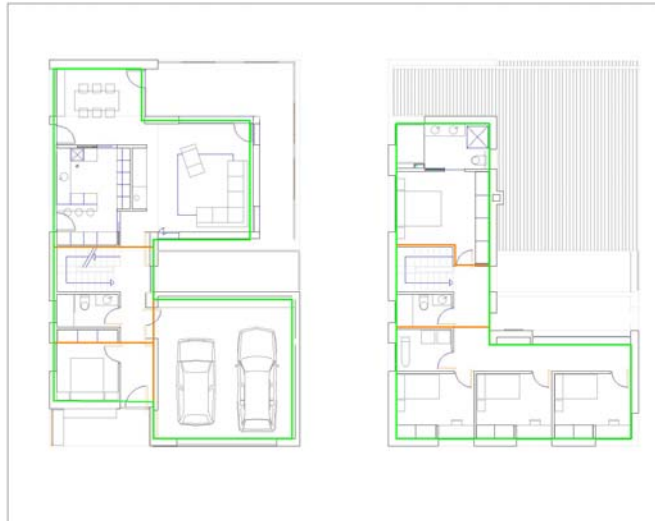
La macro contiene una pestaña llamada Propiedades de Capas (“PropCapas”), la cual se muestra en la siguiente figura, y en la que se asignan las composiciones de la base de datos del programa a las capa del documento.



**Figura 99: Pantalla de asignación de propiedades de composición a cada capa del archivo.**

### 4.1.3. INTERSECCIÓN DE ESPACIOS EN HORIZONTAL

El proceso de generación de la estructura en 3D del edificio de forma automática tiene varias etapas que no resultan simples a la hora de implementar. La primera etapa consiste en la intersección de espacios de la misma planta, situados en la misma altura. En ella se realiza un reconocimiento del tipo de muros existente en el proyecto. Cada una de las polilíneas que forman el contorno son analizadas vértice a vértice para ver si la línea que los une representa un cerramiento exterior o un cerramiento interior. Esta distinción no resulta complicada ya que en el caso en que un par de vértices son compartidos por dos polilíneas distintas, se trata de una partición interior entre dos espacios, mientras que si los vértices son únicos para una polilínea, estos indican un cerramiento exterior.



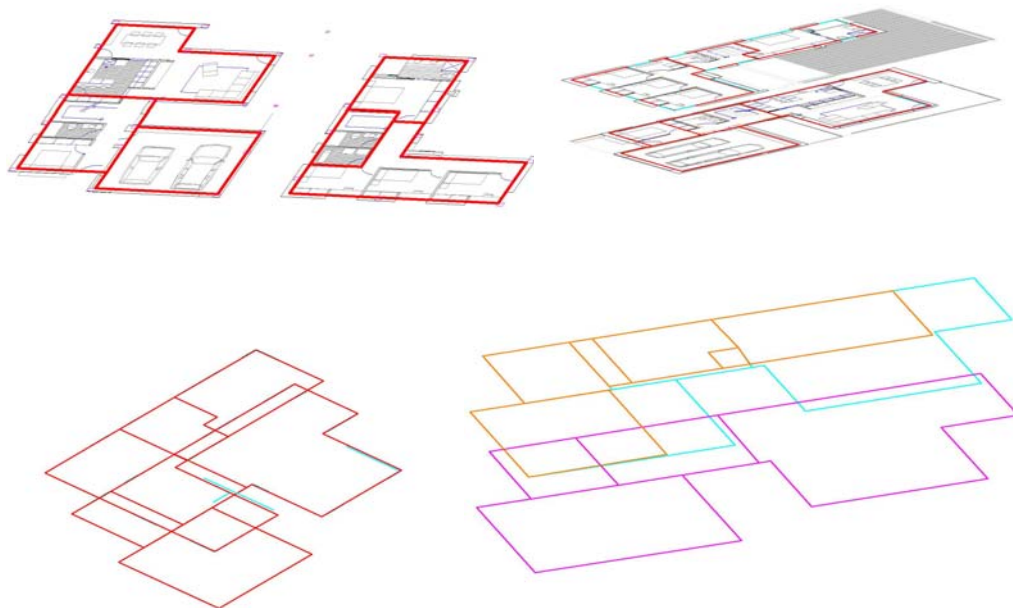
**Figura 100: Representación de los cerramientos exteriores, líneas de color verde, y cerramientos interiores, líneas de color naranja.**

En la figura anterior se puede apreciar que las polilíneas de los espacios del ejemplo anterior a dado paso a líneas de varios colores que indican distintos tipos de muros en cada planta. De color verde se representan los muros exteriores, mientras que de color naranja se indican los muros que separan distintos locales del mismo edificio. En esta fase previa, los elementos siguen sin tener las dimensiones reales ya que cada una de las líneas representa un cerramiento vertical.

#### **4.1.4. INTERSECCIÓN DE ESPACIOS EN VERTICAL**

Cuando se sitúan distintas plantas a diferentes alturas y la distribución de los locales en cada una de ellas es distinta, aparecen intersecciones entre los locales de distintas alturas que generan más de un forjado interior entre ambas, por lo que el problema se complica. Aparece la necesidad de cortar polígonos para calcular las intersecciones entre las distintas alturas.

Esto es lo que sucede en el ejemplo que se observa a continuación. Las dos plantas que forman el edificio tienen formas distintas, por lo que al situarlas una sobre otra, el techo de un espacio de la planta inferior estará en contacto con el suelo de varios locales de la planta superior, con lo que habrá que dividir el mismo en tantas partes como locales contacte.



**Figura 101: Representación de los forjados en forma de polilíneas, en naranja los interiores, en azul los exteriores y en violeta los forjados al terreno de la planta baja.**

En la figura anterior se observa que en la figura inferior derecha, el espacio situado en la planta inferior a la izquierda genera en su parte superior dos techos, uno de color azul que representa un techo exterior y otro de color naranja que representa un techo interior.

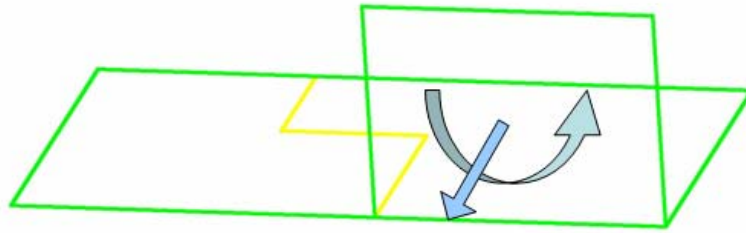
#### **4.1.5. GENERACIÓN DE POLILÍNEAS DE LOS CERRAMIENTOS**

En el proceso anterior se ha descrito la intersección entre espacios de diferentes plantas, lo cual generaba los polígonos que representan los cerramientos horizontales, techos y suelos. A continuación se comenta el modo en que se generan los cerramientos verticales o muros.

Se parte de la representación geométrica obtenida en la intersección de espacios en horizontal (Figura 95: representación de los distintos contornos térmicos de cada una de las plantas que conforman el edificio.), ya que en ella se crean en forma de líneas la posición de los cerramientos verticales. El siguiente paso consiste en transformar estas líneas en LWPolylines de AutoCAD con la geometría correspondiente

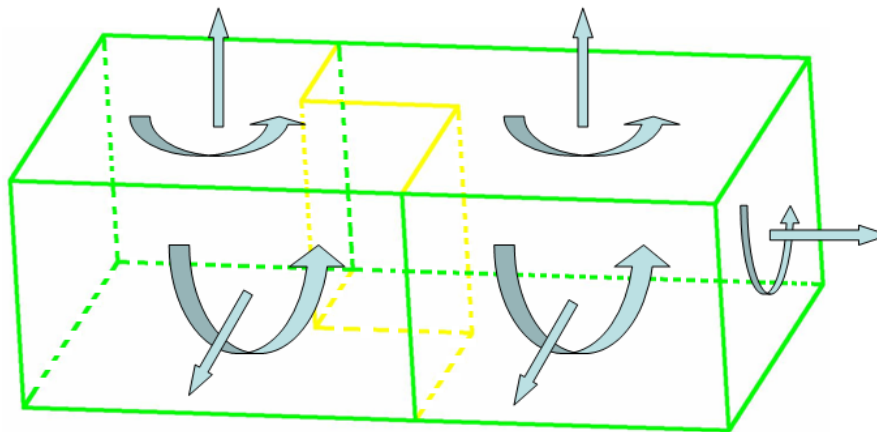






**Figura 102: Generación de una pared exterior, el sentido de los vértices es antihorario.**

Los cerramientos exteriores se generan en sentido antihorario, de manera que la normal de todos los elementos que forman la envolvente apunta hacia el exterior del edificio, tal y como se observa en la figura anterior. Es necesario construir el edificio de esta manera ya que cuando se utiliza el algoritmo de sombras los polígonos que generan sombras son aquellos que tienen la luz en su parte delantera, y el sentido viene indicado por la normal.



**Figura 103: Generación de las paredes del edificio en sentido antihorario.**

Por lo que respecta a las paredes interiores del edificio el procedimiento de generación es similar, pero en este caso cada cerramiento viene representado por dos polilíneas, cada una de ellas pertenece a uno de los locales que conecta.

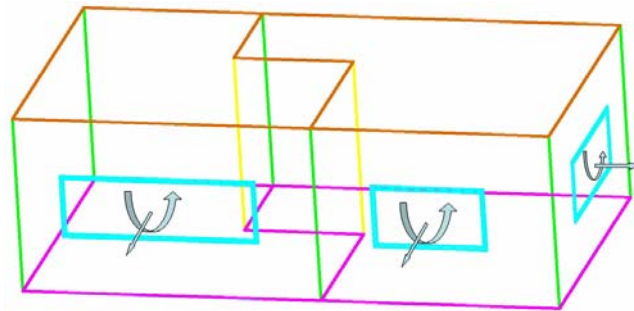
La altura de los cerramientos del espacio viene determinado por la diferencia de las cotas entre las distintas plantas. En el caso de la última planta del edificio, se coloca por defecto un valor determinado que puede ser modificado.

#### **4.1.6. GENERACIÓN DE LOS HUECOS**

Al igual que los cerramientos, los huecos como las ventanas se generan a partir de la línea en el plano que las representa. La anchura de la ventana viene determinada por la longitud de la línea que la representa, pero los valores de altura

de la misma y la altura del alféizar se asigna por defecto, aunque posteriormente puede modificarse si se cambia el elemento de capa de AutoCAD en la que está situado, o se cambian las propiedades que representa la misma.

Otra característica que deben cumplir los polígonos que representan las ventanas es que el sentido de sus vértices debe ser antihorario, igual que el del cerramiento exterior en el que se colocan, para poder calcular los polígonos de sombra que genera al aplicar el algoritmo de sombras a la escena. Además la posición de las ventanas está ligeramente adelantada a la del cerramiento en donde están ubicadas, ya que de no ser así el muro ocultaría la ventana y ésta quedaría en sombra en todo momento.



**Figura 104: Representación de las ventanas en la estructura del edificio.**

#### **4.1.7. VENTAJAS**

La ventaja de construir el edificio en 3D es poder identificar de forma sencilla la posición de cada uno de los elementos que forman la estructura del edificio en el programa de cálculo de cargas y demanda térmica, la posición de una pared en concreto, o de una ventana exterior.

### **4.2. DETERMINACIÓN DE LAS POSICIONES SOLARES DE ANÁLISIS**

La determinación de los factores de sombra de los elementos del contorno se precalcula antes de empezar la simulación anual del edificio. Por tanto el cálculo de los factores se almacena en el documento y archivo DXF de la manera que se explicará en el siguiente apartado. Para la realización del cálculo de sombras es necesario definir la trayectoria del sol a lo largo del año.

La posición del sol a lo largo del año se describe en el sistema de coordenadas horizontal con dos coordenadas angulares, la altura solar ( $h_s$ ) y el azimut ( $A_s$ ), Ref. 21. La altura solar representa el ángulo que existe entre el horizonte y la posición del sol, mientras que el ángulo azimut representa la diferencia entre la posición del Sur y la proyección del sol sobre el plano del horizonte, teniendo en cuenta que es positivo para posiciones del sol hacia el Oeste y negativo para posiciones del sol al Este (antes del mediodía).



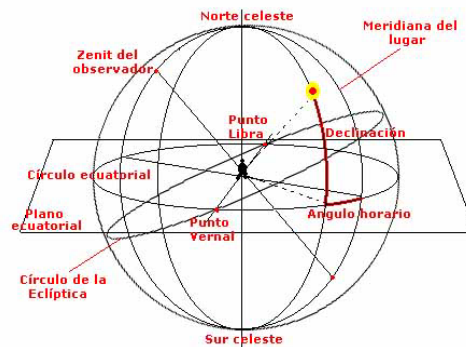
Para calcular el valor de las coordenadas del sistema de referencia horizontal necesitamos conocer el valor de las dos variables que definen la posición del sol en el sistema de referencia ecuatorial local o sistema horario. Estas variables son el ángulo horario ( $\alpha_s$ ) y la declinación ( $\delta_s$ ) que se definen en las siguientes expresiones:

$$\alpha_s = (hora\_solar - 12h) \cdot 15^\circ / h$$

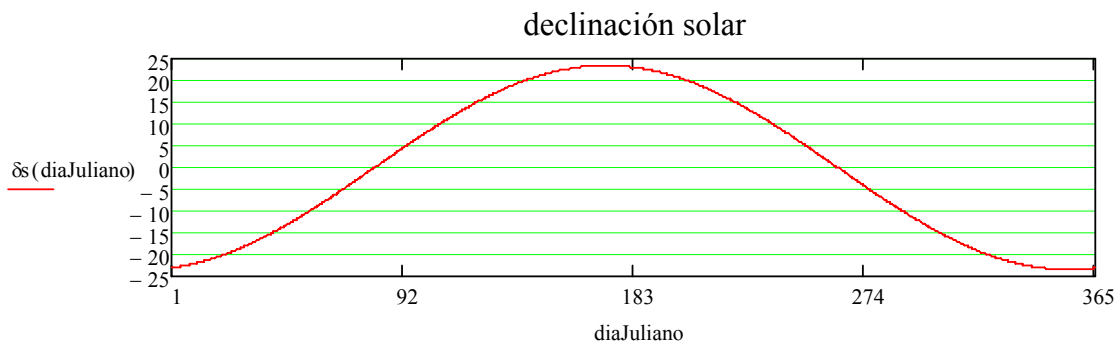
**Ecuación 7**

$$\delta_s = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(360 \cdot \frac{284 + \text{diaJuliano}}{365}\right)$$

**Ecuación 8**



**Figura 105: Sistema de referencia ecuatorial local u horario**  
Fuente: [personales.ya.com/casanchi/ast/sistecor.htm](http://personales.ya.com/casanchi/ast/sistecor.htm)



**Figura 106: Representación de la declinación según el día juliano.**

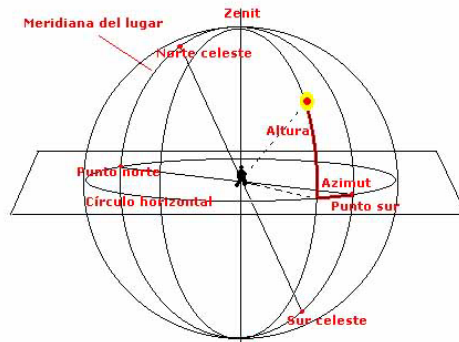
Con el cálculo de estas dos variables que definen la posición del sol en el sistema de referencia ecuatorial se calcula ahora el valor que tienen las variables que definen la posición del astro en el sistema de referencia horizontal:

$$\text{sen}(h_s) = \text{sen}(\text{latitud}) \cdot \text{sen}(\delta_s) + \cos(\text{latitud}) \cdot \cos(\delta_s) \cdot \cos(\alpha_s)$$

**Ecuación 9**

$$\text{sen}(A_s) = \frac{\cos(\delta_s) \cdot \text{sen}(\alpha_s)}{\text{sen}(h_s)}$$

**Ecuación 10**



**Figura 107: Sistema de referencia horizontal.**  
**Fuente: [personales.ya.com/casanchi/ast/sistecor.htm](http://personales.ya.com/casanchi/ast/sistecor.htm)**

Para la posición de los puntos de luz en el programa CAD es necesario definir el vector unitario de la dirección de los rayos solares. Para ello utilizamos el sistema de referencia que tiene el programa y definimos que el eje Y del mismo representa la orientación Norte, mientras que el eje X representa la orientación Este y la coordenada Z del programa indica la altura. De esta manera el vector unitario de la posición del sol se define con las siguientes coordenadas:

$$\vec{v}_{sol} = -\cos(h_s) \cdot \text{sen}(\alpha_s) \cdot \vec{x} - \cos(h_s) \cdot \cos(\alpha_s) \cdot \vec{y} + \text{sen}(h_s) \cdot \vec{z}$$

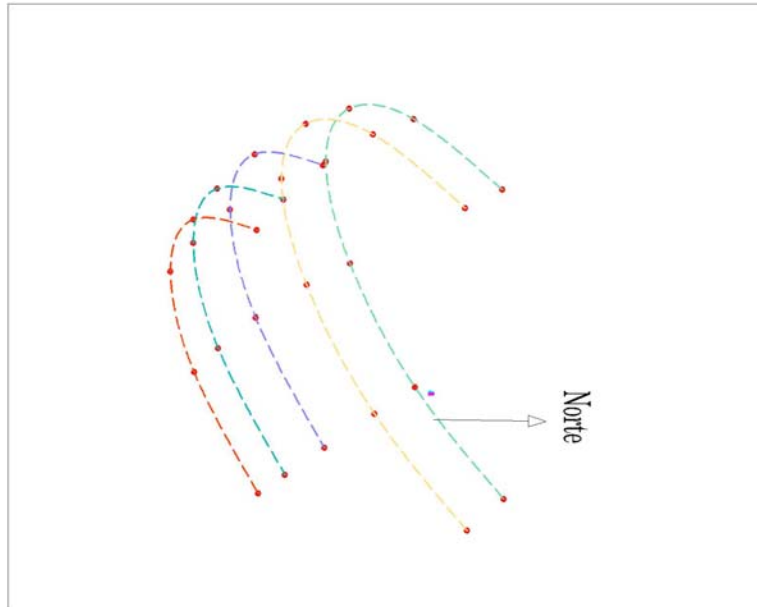
**Ecuación 11**

Como se ha comentado anteriormente, el análisis de sombras se realiza como un pre-procesado del análisis energético del edificio. De esta manera, la información sobre el sombreado de cualquier polígono de la escena se almacena como información no geométrica del edificio. Con el fin de no sobrecargar la cantidad de información del archivo DXF de trabajo, resulta conveniente reducir el número de elementos que definan el sombreado de los muros. Así, en lugar de calcular el factor de sombreado de cada cerramiento para cada hora del año, se reducen los datos a unas determinadas posiciones solares representativas para todo el periodo anual.

El análisis de sombras se reduce a:

- un día de cada mes
- entre las 6h y las 20h, con un intervalo de dos horas
- para cinco trayectorias solares que representan todos los meses del año.

De esta manera, la representación anual del sombreado de cada elemento se reduce a 40 valores que resumen las 8763 horas anuales.

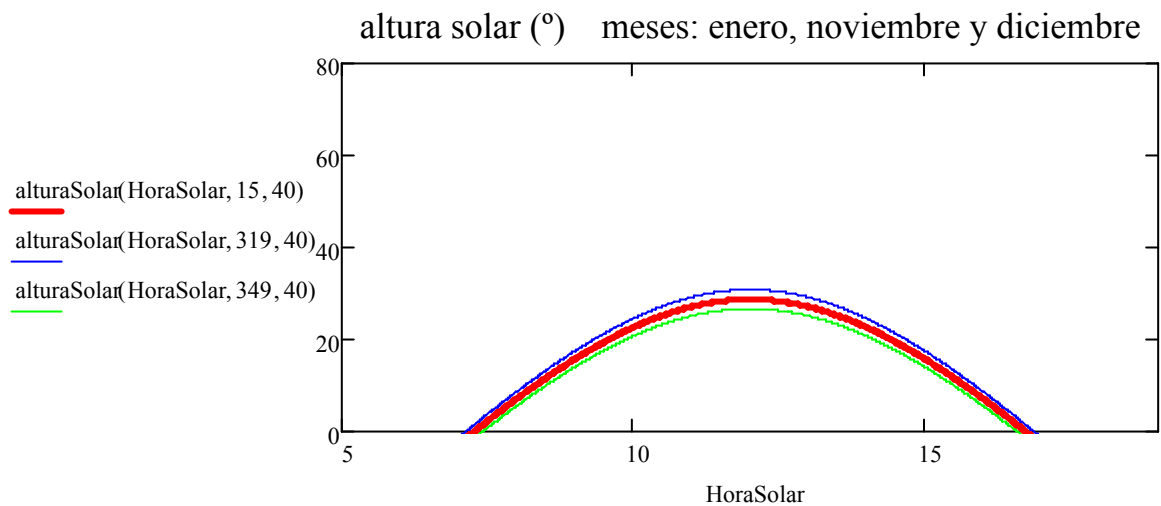


**Figura 108: Trayectorias solares más representativas (desde enero hasta mayo) para una posición de latitud 40° Norte.**

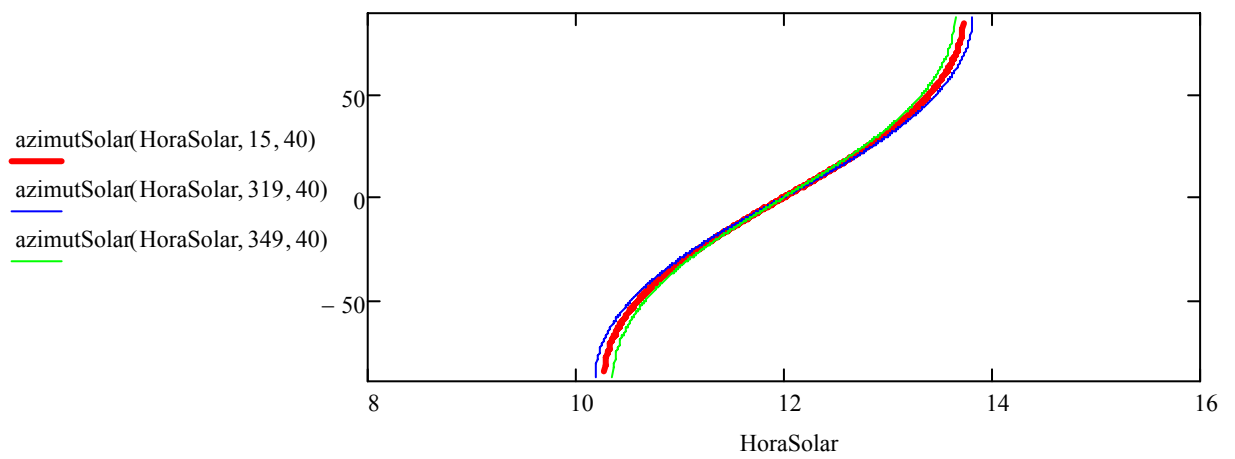
En la figura se observan las cinco trayectorias solares consideradas, cada una de ellas representa un grupo de meses, definimos los meses representados en cada una de ellas desde la trayectoria más baja a la más alta:

Datos para una LATITUD 40° NORTE

- noviembre, diciembre y enero

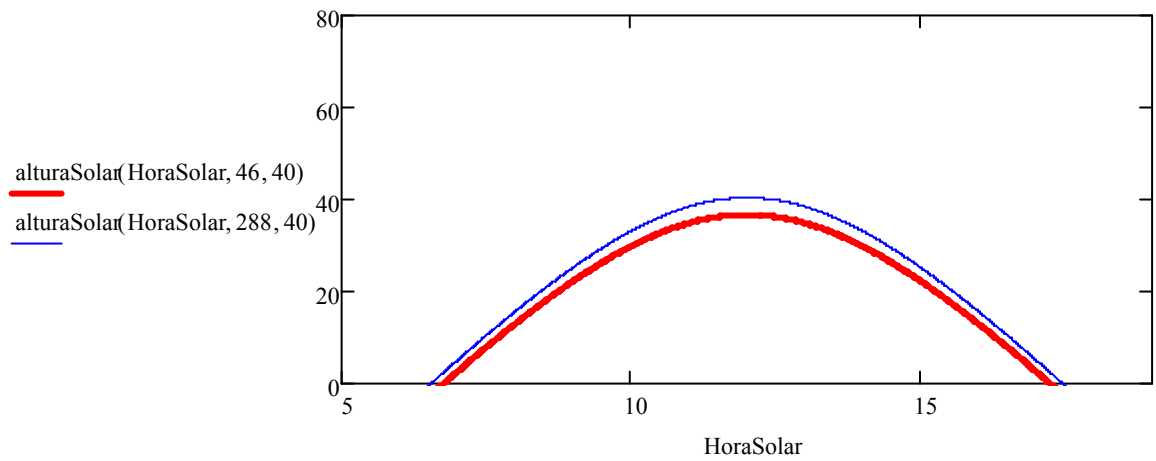


azimut solar (°) meses: enero, noviembre y diciembre

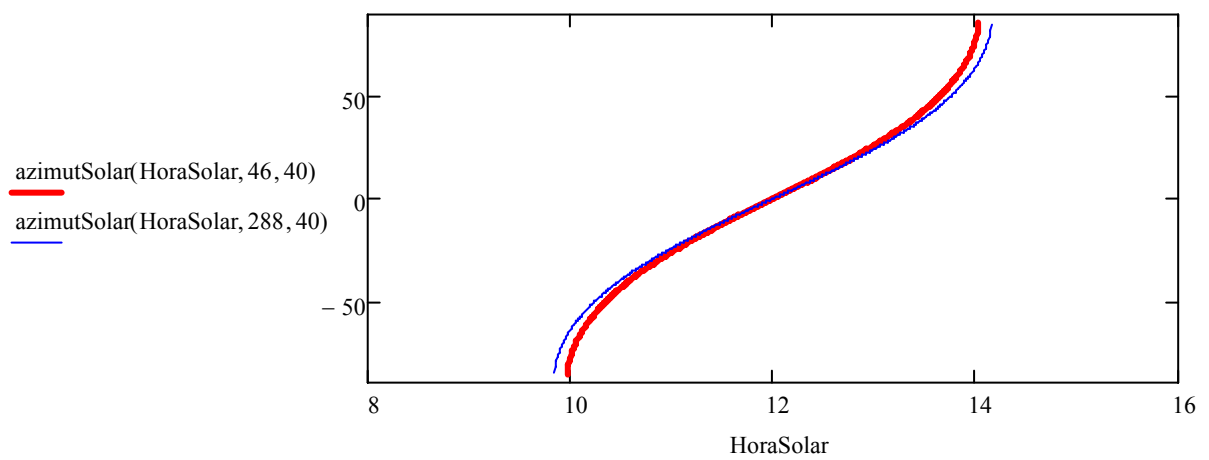


- febrero, octubre

altura solar (°) meses: febrero y octubre

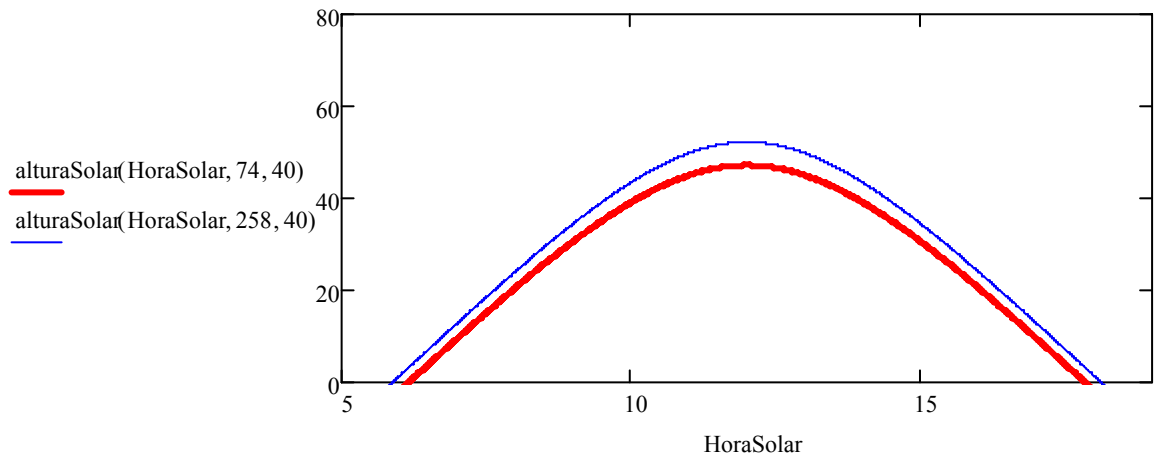


azimut solar (°) meses: febrero y octubre

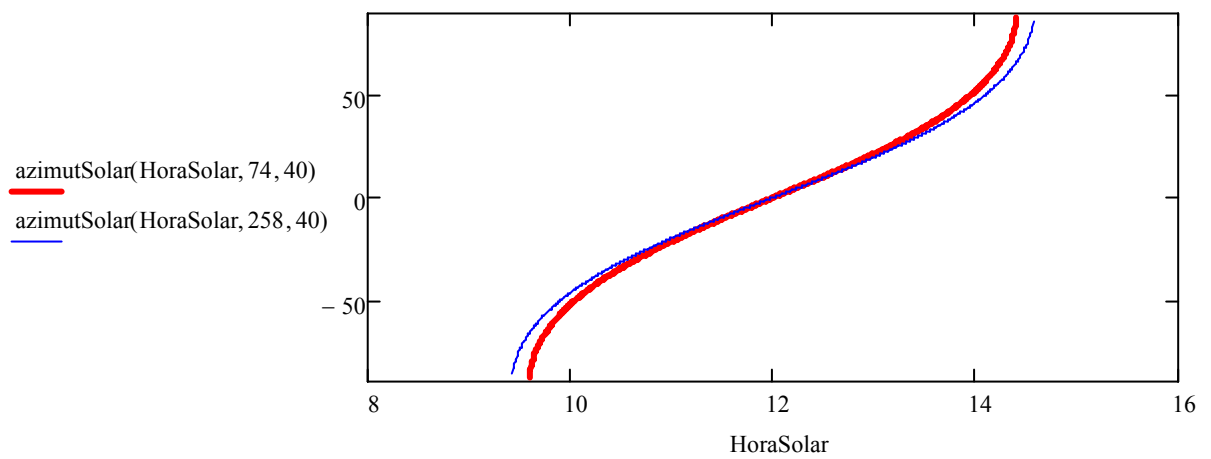


- marzo, septiembre

altura solar (°) meses: marzo y septiembre

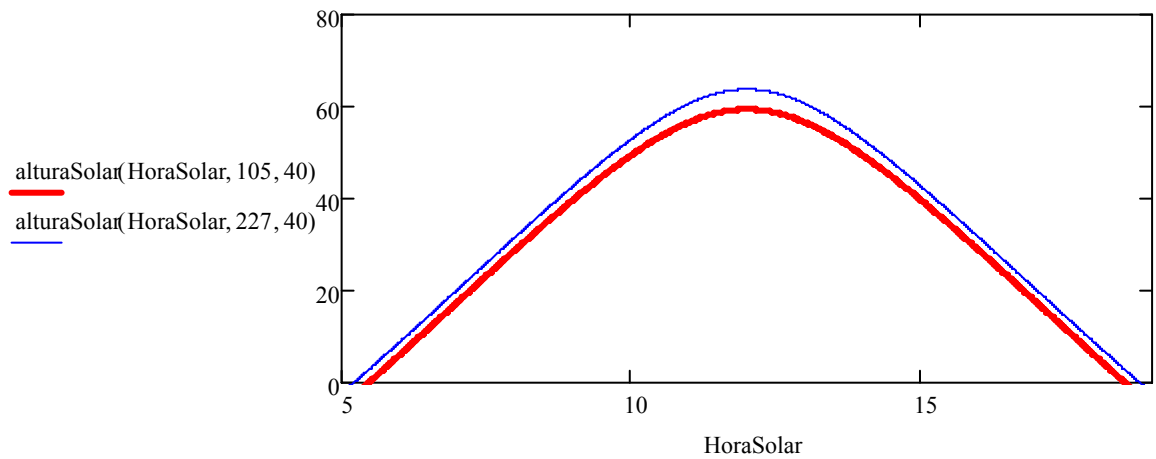


azimut solar (°) meses: marzo y septiembre

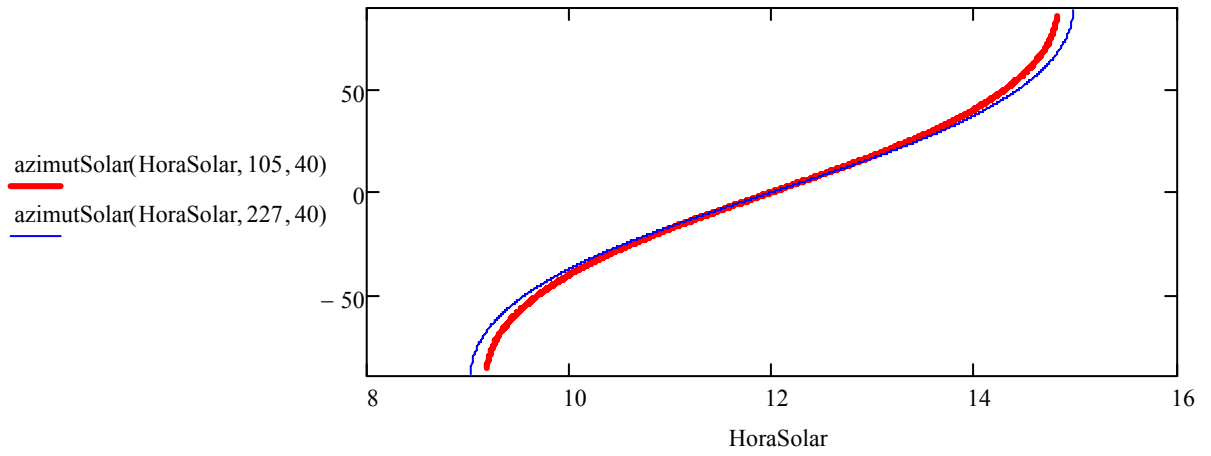


- abril, agosto

altura solar (°) meses: abril y agosto

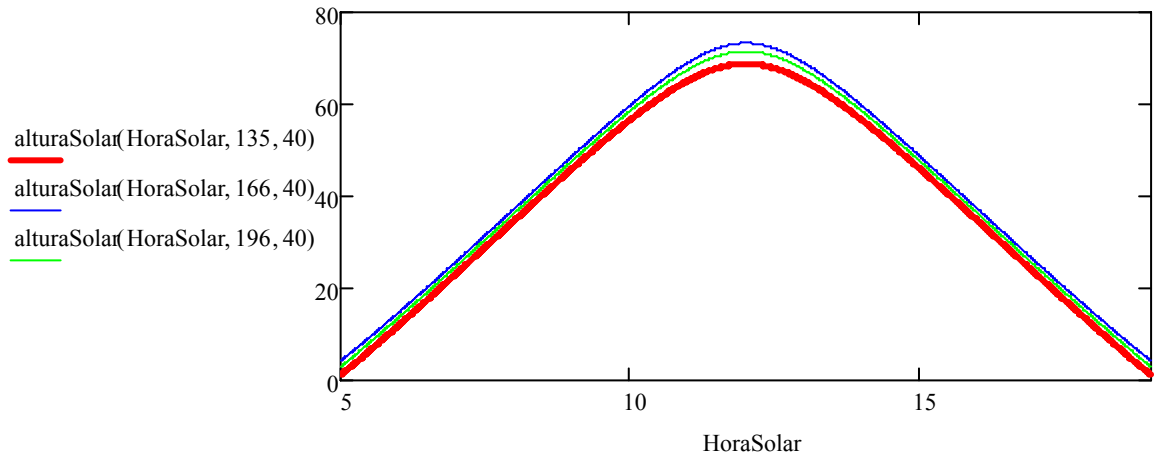


azimut solar (°) meses: abril y agosto

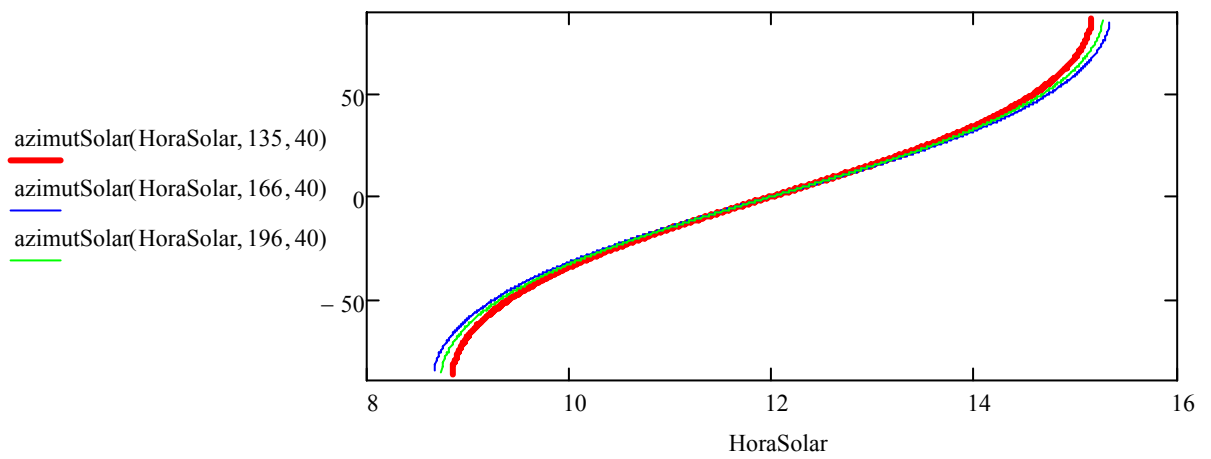


- mayo, junio y julio

altura solar (°) meses: mayo, junio y julio



azimut solar (°) meses: mayo, junio y julio



### 4.3. CÁLCULO DE LA FRACCIÓN SOLEADA

Para cada una de las posiciones solares establecidas se realiza un cálculo de sombras de la escena. La escena de polígonos que hay que analizar es idéntica en cada instante, la única diferencia está en la posición del punto de luz y por tanto en los polígonos de sombra que se proyectan en cada instante. El algoritmo está programado de manera que las sombras que se generan se represente también en forma de polígonos, y cada uno de estos polígonos está asociado con el polígono de la escena inicial en el cual se proyecta.

En el caso del documento en CAD, los polígonos de la escena inicial representan elementos de la envolvente del edificio: muros exteriores, techos exteriores, ventanas, puertas, etc. y por tanto, al aplicar el algoritmo de cálculo de sombras, los nuevos polígonos que representan las sombras van asociados directamente a las paredes y techos donde están proyectados. De esta manera resulta fácil conocer la porción de muro que está a la sombra y la porción soleada.

$$f_{sol} = \frac{A_{total} - A_{sombra}}{A_{total}}$$

Ecuación 12

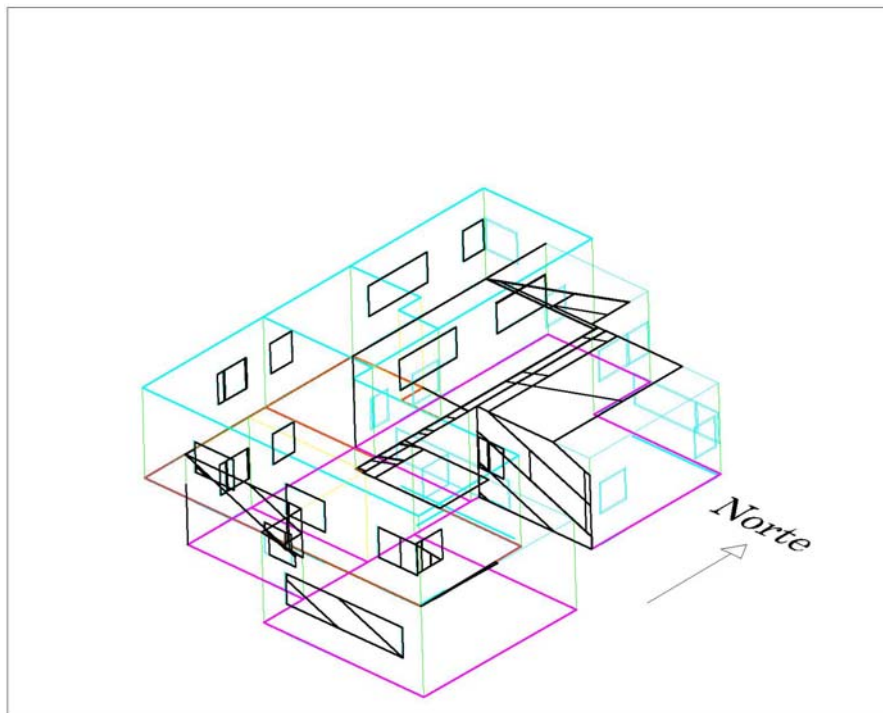


Figura 109: Sombras proyectadas sobre la escena inicial en el mes de marzo a las 16h solares para el edificio situado en una latitud norte de 40°.

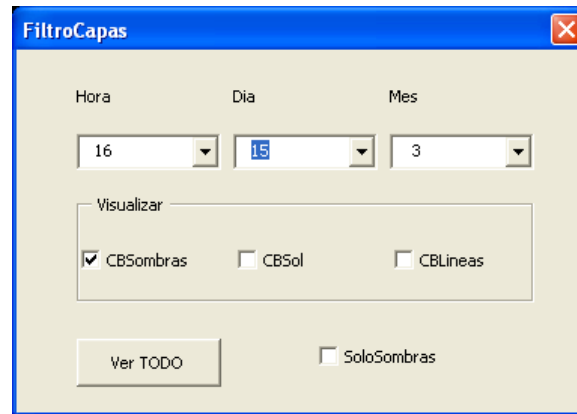


Figura 110: Pantalla de la macro para visualizar los polígonos de sombra en el periodo deseado.

#### 4.4. BIBLIOGRAFÍA

Ref. 21

José Manuel Pinazo. "Manual de climatización. Tomo II Cargas térmicas". Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. ISBN 847721-341-0 (1995)



## **5. INTEROPERABILIDAD**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

En los proyectos donde tienen que intervenir un gran número de personas, es el caso de los proyectos relacionados con el sector de la construcción, la gestión resulta especialmente difícil. Dentro del proyecto de construcción de cualquier edificio, aparte del proyecto diseñado por el arquitecto, existen distintos subproyectos que deben ser acometidos por distintas organizaciones, instalaciones eléctricas, instalaciones de comunicación del edificio, instalaciones térmicas, instalaciones de fluidos y gestión del mantenimiento del edificio son algunas de ellas.

Debido a la multitud de agentes de distintos sectores que intervienen en esta clase de proyectos, la cantidad de información que se maneja es muy elevada y variada. Pero el mayor problema está en que gran parte de la información que se intercambia se basa en formatos y tipos de datos diferentes, dependiendo de la aplicación o usuario de la misma. Muchas veces esos formatos no son del todo compatibles y parte de los datos se han de volver a introducir manualmente o calcular de nuevo, con el peligro de que parte de los datos puedan perderse o de que los datos que se manejan en distintas fases del proyecto no sean coherentes. Además, esto obliga a revisiones y correcciones constantes que retrasan el proyecto, incluso a rehacer parte de las tareas.

Los modelos de información sirven, precisamente, para evitar este tipo de problemas a la hora de manejar e intercambiar información. Lo que se quiere disponer con ellos es un mecanismo ágil de intercambio de información entre todas las aplicaciones y personas implicadas en el proyecto. Para ello el modelo debe basarse en formatos de datos estandarizados y disponer de un mecanismo de comunicación adecuado. Este fue el motivo que originó la aparición, en las herramientas CAD, del formato DXF (Drawing eXchange Format), formato que se va a utilizar para realizar este proyecto.

La interoperabilidad entre aplicaciones informáticas se entiende como la comunicación entre las mismas, para ellos se necesita crear una serie de formatos comunes de información de manera que puedan acceder a ellos y entenderlos las distintas aplicaciones que se quiera comunicar. La interoperabilidad mejora la productividad ya que evita la repetición de tareas como la definición de elementos. En el caso que se describe, se trata de comunicar dos aplicaciones relacionadas con el sector de la construcción, más concretamente la parte relacionada con el diseño de edificios.

Por una parte, existen aplicaciones CAD dedicadas a la definición de la geometría del edificio, por otro lado, existen aplicaciones para simulación y cálculos de instalaciones térmicas para el edificio. Las segundas necesitan la introducción de la geometría del mismo, en lo cual se invierte la mayor parte del tiempo, pero este proceso ya había sido realizado por el arquitecto anteriormente, así que la finalidad es crear una estructura de información que manejen las aplicaciones CAD que pueda ser utilizada posteriormente para el cálculo de simulación y diseño de instalaciones térmicas.

## 5.2. EL CONCEPTO DE BIM

BIM (Building Information Modeling) puede traducirse como Modelado Integrado de Información para la Construcción. La filosofía de los programas CAD con tecnología BIM es integrar toda la información necesaria para llevar a cabo un proyecto de construcción en sus fases iniciales, de modo que esta información esté disponible por otras aplicaciones que resuelven otras fases del proyecto de construcción. El flujo de información de los programas CAD/BIM hacia otras aplicaciones se realiza a través del formato IFC.

De este modo, el proceso de introducción de datos se simplifica y cada aplicación informática que interviene en el proyecto no necesita una introducción de datos completa, sino que puede aprovechar los datos introducidos en el programa CAD/BIM, con el incremento de seguridad y la reducción de esfuerzo consiguientes.

La tecnología BIM se está implantando en los principales programas de CAD (Allplan®, Archicad®, y Revit® Architecture) y su evolución ofrecerá a los usuarios mejoras sustanciales en el desarrollo completo de sus proyectos.

El concepto de BIM abarca todo el proceso de diseño y gestión de toda la información a lo largo del ciclo de vida del edificio. No sólo es un simple modelo 3D en un ordenador, el Edificio Virtual contiene además con gran detalle información adicional sobre los materiales del edificio y sus características. Es una base de datos tridimensional que hace un seguimiento de todos los elementos que componen el edificio. Esta información puede incluir área y volumen de superficies, propiedades térmicas, descripciones de las habitaciones, precios, información sobre especificaciones de producto, ventanas, puertas y acabados, y más.

BIM concierne tanto a la geometría, a la relación con el espacio, a la información geográfica, a las cantidades y las propiedades de los componentes de un edificio (por ejemplo, detalles de fabricantes de puertas). BIM puede ser utilizado para ilustrar el proceso completo de edificación, de mantenimiento e incluso de demolición (ahora se reciclan más materiales).



**Figura 111: Esquema BIM, la información del edificio es compartida por los distintos agentes que intervienen en ella: constructores, arquitectos, propietarios, ingenieros, etc.**

**Fuente:** <http://www.microsolresources.com/CAD2008/revitArchitecture.cfm>

Una de las cosas más efectivas del concepto del BIM es que existe una única base de datos del edificio, lo que permite que todos los agentes implicados en el proceso constructivo nutran sus programas informáticos con la misma información. Esto es básicamente útil para realizar el cálculo de estructuras, instalaciones, etc., ya que permite con estos datos realizar simulaciones, por ejemplo, de qué consumo energético tendrá el edificio o el proyecto que estamos realizando.

### **5.3. EL FORMATO DE DATOS IFC**

El formato de datos IFC (Industry Foundation Classes) es un modelo de datos neutral y abierto, el cual no está controlado por una empresa particular sino por un grupo de empresas. Es una estructura de datos orientada a objetos y desarrollada por el organismo International Alliance for Interoperability (IAI) en el año 1995. El objetivo principal de la creación del formato IFC es facilitar la interoperabilidad en la industria de la construcción, es por tanto el formato utilizado por el BIM.

El IAI es la unión de distintos sectores industriales relacionados con la construcción: arquitectos, ingenieros, constructores, propietarios, empresas de software, agencias gubernamentales, investigadores, universidades, etc. y cuya misión es la de integrar sus procesos a una estructura común con la finalidad de incrementar la comunicación, la eficiencia, la productividad y la calidad desde cada fase: diseño, construcción y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del edificio. Todas estas características van acompañadas de la disminución del tiempo y los costes.

Desde el año 2005 el formato IFC lo desarrolla y mantiene buildingSMART International que es el nuevo nombre que toma el IAI, el cual se encarga de la adaptación e implementación del formato alrededor del mundo. La primera de las empresas que distribuyen software CAD en implementar el formato IFC es Graphisoft.

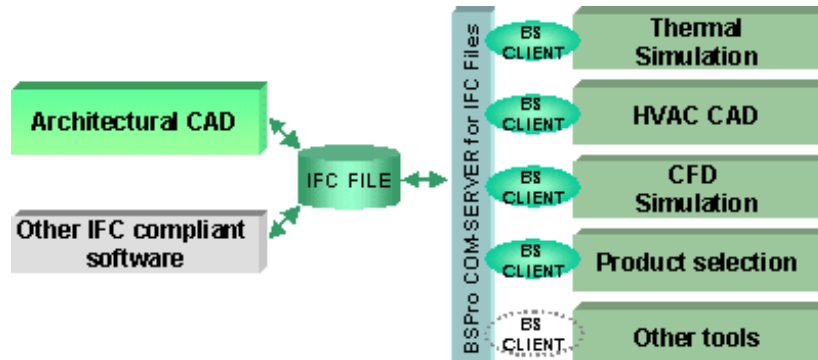


Figura 112: Esquema de trabajo con aplicaciones que utilizan el formato IFC.  
Fuente: <http://www.granlund.fi/BSPRO/product.htm>

Las características más importantes que se destacan del proyecto de IFC son:

- El formato IFC representa una estructura de datos para facilitar el manejo de información entre las distintas aplicaciones que intervienen en la construcción de un edificio.
- El modelo IFC tiene una estructura orientada a objetos basada en la definición de clases que representan elementos, procesos, formas, etc., los cuales se utilizan en las aplicaciones informáticas empleadas para la construcción y gestión de los proyectos de edificación.
- La definición de las clases empleadas en el formato IFC está pensada para el intercambio de información entre aplicaciones, posteriormente cada aplicación utilizará la información que necesite para sus cálculos.
- La estructura IFC es un modelo neutral y abierto cuya estructura es de carácter público, por lo que no está sujeto ni controlado por ninguna compañía en concreto.

La versión IFC2X del formato fue aprobada como ISO/PAS 16739, convirtiendo este formato en un estándar ISO.

#### 5.4. FORMATO FIDE (Formato de Intercambio de Datos de la Edificación)

El objetivo de FIDE es el desarrollo de un Formato de Intercambio de Datos en la Edificación, común a los distintos agentes de la edificación (promotor, proyectista, dirección de obra, suministrador de materiales, constructor, etc.) así como con las Administraciones Públicas que facilite la interoperabilidad entre dichos agentes, independientemente de las aplicaciones informáticas que éstos utilicen, ya sea en planificación, diseño, presupuestos, gestión, autorizaciones administrativas, etc.

El modelo FIDE está centrado en el ámbito del Código Técnico de la Edificación y su desarrollo está coordinado a nivel nacional a través de un grupo de trabajo estable

supra regional que establece las bases para su desarrollo y que coordina y controla las extensiones del modelo, estableciendo sistemas de aprobación e integración de desarrollos parciales realizados por terceros en la estructura general de FIDE, garantizando así la escalabilidad del modelo y la interoperabilidad entre distintos ámbitos del CT.

FIDE es público y abierto. Además, paralelamente se estudian sus posibles relaciones con estándares y modelos de datos reconocidos internacionalmente, como el IFC, facilitando la interrelación entre ambos. Por este motivo FIDE está siendo difundido a nivel nacional.

El desarrollo del modelo de datos FIDE se afronta de forma abierta, gradual y colaborativa. Así pues está abierto a la participación de grupos de trabajo interesados en áreas concretas dentro del sector de la construcción. Su aportación será integrada en el modelo de datos, haciéndolo de esta forma crecer en las áreas que realmente tengan una demanda de uso.



Figura 113: Esquema general del fichero FIDE.

## **5.5. EL FORMATO DXF (Drawing eXchange Format)**

### **5.5.1. ORIGEN**

El formato de intercambio de datos DXF fue creado por Autodesk para tener un método de intercambio de información en un lenguaje genérico que ellos controlaran pero del cual no fueran propietarios. Según Autodesk, el formato DXF fue creado con el fin de poder intercambiar dibujos e información entre AutoCAD y otras aplicaciones. Este tipo de archivos apareció en 1982, junto con la primera versión del programa AutoCAD, propiedad de Autodesk. Desde entonces todas las versiones de AutoCAD manejan este tipo de formato. El hecho de haber sido creado por una empresa privada, ha hecho que muchas compañías informáticas no lo consideren un lenguaje estándar.

### **5.5.2. CARACTERÍSTICAS**

Una de las ventajas de los archivos DXF es que se representan en formato de texto, es decir, pueden ser modificados por editores o procesadores de texto sin ninguna dificultad. Esto los hace más fáciles de manejar, ya que permiten la posibilidad de poder resolver algún error antes de ser interpretados por algún programa CAD.

Las siglas DXF corresponden al nombre “Drawing eXchange Format”, aunque en realidad no se trata solamente de un formato de intercambio de dibujos, ya este formato está pensado para poder intercambiar información tanto geométrica como no geométrica, aunque este uso no está tan extendido incluso a algunos les puede resultar desconocido. En el ámbito de este proyecto, se va a utilizar información geométrica e información no geométrica.

## **5.6. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO**

Ref. 22  
[www.fide.org.es](http://www.fide.org.es)

Ref. 23  
[www.five.es](http://www.five.es)

Ref. 24  
[www.archicad.es](http://www.archicad.es)

Ref. 25  
[www.cype.es](http://www.cype.es)

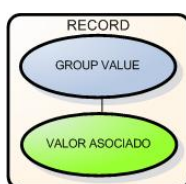
Ref. 26  
[www.ifcwiki.org](http://www.ifcwiki.org)

Ref. 27  
[www.autodesk.com/techpubs/autocad/acad2000/dxf/](http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acad2000/dxf/)

## 6. ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN TÉRMICA DEL EDIFICIO EN EL FORMATO DXF.

### 6.1. ESTRUCTURA DEL FORMATO DXF

El formato DXF es un tipo de representación mediante etiquetas. Esto significa que cada dato que se incluye en el archivo va precedido por una etiqueta, que no es más que un número entero llamado “group code” o código de grupo. La misión de los códigos de grupo es darle significado al dato que les sigue. Según sea uno u otro el valor del código, se puede interpretar de una forma u otra el significado del dato siguiente, y no sólo eso, sino que además, el valor del código de grupo indica también el formato del dato que le sigue (entero, doble, cadena de caracteres, etc.).



**Figura 114:** representación del record formado por el group value y el valor asociado.

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 3: Tipo de valores según el tipo de grupo.), se clasifican en distintos rangos los posibles valores de códigos de grupo, los cuales pueden tomar valores comprendidos entre el 0 y el 1071. Según el rango en el que esté el “group code”, el tipo de dato que les seguirá será de un tipo u otro. La longitud máxima que puede tener una cadena de caracteres en este formato de archivo es de 255 caracteres.

Code range	Group value type
0-9	String. (With the introduction of extended symbol names in AutoCAD 2000, the 255 character limit has been lifted. There is no explicit limit to the number of bytes per line, although most lines should fall within 2049 bytes.)
10-59	Double precision 3D point
60-79	16-bit integer value
90-99	32-bit integer value
100	String (255-character maximum; less for Unicode strings)
102	String (255-character maximum; less for Unicode strings)
105	String representing hexadecimal (hex) handle value
140-147	Double precision scalar floating-point value
170-175	16-bit integer value
280-289	8-bit integer value
300-309	Arbitrary text string
310-319	String representing hex value of binary chunk

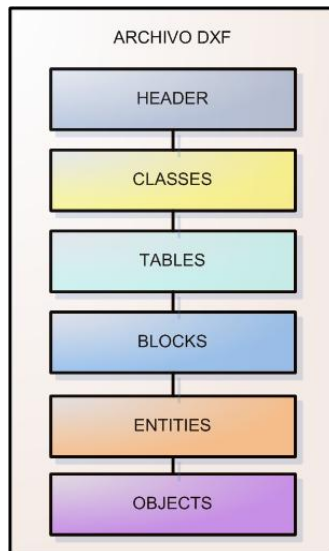
320-329	String representing hex handle value
330-369	String representing hex object IDs
370-379	8-bit integer value
380-389	8-bit integer value
390-399	String representing hex handle value
400-409	16-bit integer value
410-419	String
999	Comment (string)
1000-1009	String. (Same limits as indicated with 0-9 code range.)
1010-1059	Floating-point value
1060-1070	16-bit integer value
1071	32-bit integer value

**Tabla 3: Tipo de valores según el tipo de grupo.**

El binomio formado por el código de grupo y el valor asociado definen aspectos de un objeto o entidad. El valor asociado siempre va precedido por el código de grupo en la línea anterior. Los valores asociados pueden ser caracteres, enteros, dobles, etc. existen códigos de grupo especiales, para separar el inicio y fin de las secciones del documento, para separar las distintas tablas o para indicar el final del archivo. La longitud máxima de las cadenas es de 255 caracteres. Si algún valor asociado es superior a esta longitud de cadena, esta queda truncada al límite máximo.

La estructura general del archivo se divide en seis partes llamadas secciones, cada una de ellas almacena un tipo de información determinada, en unos casos puede ser geométrica y en otros no geométrica. El nombre de las distintas secciones por orden de aparición es: Header, Classes, Tables, Blocks, Entities y Objects. Las secciones Blocks y Entities son las encargadas de contener la información geométrica del dibujo, mientras que las demás contienen información no geométrica. La información no geométrica se refiere a información sobre el manejo del dibujo que tiene el usuario, creación de grupos entre entidades, otras aplicaciones que un programa deberá reconocer al ejecutar el dibujo, variables que almacenan el punto de vista con el que el usuario estaba viendo el dibujo, etc.





**Figura 115: Estructura del formato DXF.**

Las características más importantes de cada sección son las siguientes:

- **HEADER:** Contiene información general sobre el dibujo, se trata del nombre de la versión y de un número de variables del sistema.
- **CLASSES:** Almacena la información referente a las aplicaciones que existen en el archivo, cuyas instancias aparecen en la sección **BLOCKS**, **ENTITIES** y **OBJECTS**.
- **TABLES:** Contiene la definición del siguiente listado de tablas.
  - **APPID:** tabla donde se definen las aplicaciones que existen en el archivo.
  - **BLOCK\_RECORD:** tabla en la que se definen los bloques del documento, que son objetos creados por la unión de entidades individuales.
  - **DIMSTYLE:** define las dimensiones creadas en el documento.
  - **LAYER:** tabla en la que se definen las capas del documento.
  - **LTYPE :** tabla en la que se definen los tipos de líneas del documento.
  - **STYLE :** tabla en la que se definen los estilos de texto del documento.
  - **UCS :** definen los sistemas de referencia de usuario creados.
  - **VIEW :** define los puntos de vista de la pantalla creados.
  - **VPORT :** define los viewports creados en el documento.
- **BLOCKS:** Contiene definición de los bloques del archivo y detalla las distintas entidades que conforman el bloque.

- ENTITIES: Contiene los objetos gráficos del documento, incluidas las referencias a los bloques insertados.
- OBJECTS: Contiene información no gráfica del documento, pero guarda entre otras cosas elementos que conocen las relaciones entre distintos elementos gráficos, por ejemplo los grupos (groups).

## 6.2. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA EN EL ARCHIVO DXF

El formato DXF está especialmente pensado para el intercambio de información gráfica. Los programas CAD utilizan el gráfico vectorial, esto significa que la imagen está compuesta por objetos geométricos independientes, por tanto el DXF posee una estructura de información en la que se definen distintos objetos geométricos, todos ellos aparecen en la sección de ENTITIES. En el siguiente listado aparecen todos los tipos de entidades que reconoce la versión DXF de AutoCAD 2000.

3DFACE	OLEFRAME
3DSOLID	OLE2FRAME
ACAD_PROXY_ENTITY	POINT
ARC	POLYLINE
ARCALIGNEDTEXT	RAY
ATTDEF	REGION
ATTRIB	RTEXT
BODY	SEQEND
CIRCLE	SHAPE
DIMENSION	SOLID
ELLIPSE	SPLINE
HATCH	TEXT
IMAGE	TOLERANCE
INSERT	TRACE
LEADER	VERTEX
LINE	VIEWPORT
LWPOLYLINE	WIPEOUT
MLINE	XLINE
MTEXT	

Todas estas entidades pueden aparecer individualmente o agrupadas en elementos llamados bloques. El bloque es una macro entidad que guarda un conjunto de entidades y la posición de unas respecto de otras. La definición del bloque aparece en la sección de BLOCKS del archivo DXF, y en la sección ENTITIES aparece un elemento por cada una de las inserciones que existan del bloque en el documento. Esta nueva

inserción es a su vez una entidad llamada INSERT, la cual posee entre otras las propiedades del punto de inserción del bloque o la capa en la cual se sitúa.

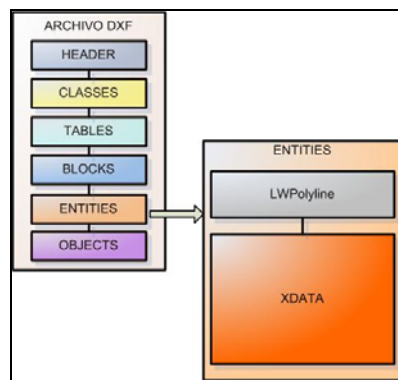
Existe otra manera de agrupar elementos en el formato DXF que no es en forma de bloque, se trata de grupos. Los grupos se representan por el elemento que tiene el nombre GROUP y que se sitúa en la sección de OBJECTS. Esta manera de agrupar elementos posee distintas propiedades a los bloques. Los grupos no pueden tener distintas inserciones, sino que se trata de un vínculo o unión que existe entre los elementos que forman un conjunto. En la aplicación que se describe los grupos representan los locales, de esta manera, un local estará formado por distintos tipos de cerramientos y huecos que serán polilíneas y bloques.

### 6.3. INFORMACIÓN NO GEOMÉTRICA EN EL ARCHIVO DXF

Para la definición geométrica del edificio utilizamos una entidad llamada LWPolyline, la cual contiene los vértices del polígono. Para asignarle un valor añadido a esta entidad, un valor no geométrico, es necesario incluir unos datos llamados datos extendidos (XDATA), los cuales contienen unos códigos de grupo especiales y de los que se puede hacer uso para darle propiedades no geométricas a ese polígono.

Los datos extendidos no pueden colocarse en cualquier elemento del archivo DXF, se añaden sólo en las entidades que lo permiten y tienen un formato característico. Los elementos que admiten los Xdata son aquellos que pertenecen a la sección ENTITIES, OBJECTS y BLOCKS.

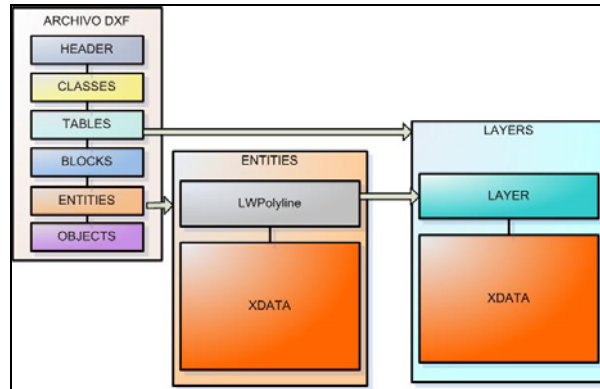
Un ejemplo del uso de los XDATA en la aplicación que se está comentando aparece a la hora de identificar una LWPolyline como un muro exterior y asignarle en los datos extendidos valores que interesen de este tipo de elemento como puede ser la orientación, el local al que pertenece, la superficie, los huecos que tienen asociados, etc.



**Figura 116: Introducción de datos no geométricos XDATA asociados a entidades geométricas LWPolyline.**

Un segundo método para incluir datos no geométricos en el archivo es mediante el uso de capas. Las capas se definen dentro de la sección de Tables, y cada una de las capas se encuentra dentro de esta sección formando un elemento llamado TableEntry. Los elementos de este tipo admiten datos extendidos por tanto son elementos que pueden contener también datos no geométricos. El siguiente esquema representa el modo en que se incluyen los datos en el archivo DXF. Cada una de las entidades

gráficas que forman el documento pertenecen a una capa, por defecto se les asigna la capa “0”. Por este motivo se puede utilizar la capa para agrupar entidades que tengan una propiedad común, la cual se describe en la capa. En el caso de esta aplicación se utilizan las capas para definir la función de cada elemento del documento. Por ejemplo, todos los muros exteriores están definidos en la misma capa, la cual contiene la información de la composición que poseen.



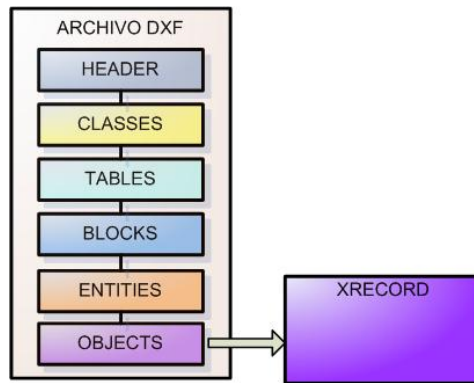
**Figura 117: Almacenamiento de datos no geométricos en una capa del documento.**

Otro elemento que se utiliza para intercambiar información no geométrica entre aplicaciones mediante formato DXF son los Xrecord. Los Xrecord son elementos pertenecientes a la sección de Objects, los cuales tienen menos restricciones que los Xdata a la hora de contener información. El formato que utilizan es sencillo, todos los Xrecord tienen los códigos de grupo comunes que se muestran en la tabla y con ellos se pueden crear estructuras internas de información para almacenar datos.

Código de grupo	Descripción
100	marcador de subclase (AcDbXrecord)
280	indicador interno de records (0-5)
1-369 (except 5 and 105)	

**Tabla 4: Códigos de grupo comunes en los elementos Xrecord.**

Un ejemplo de uso de los Xrecord en la aplicación que se describe aparece en la definición de las distribuciones horarias utilizadas en el proyecto. Cualquier software de simulación térmica de edificios necesita definir una serie de distribuciones horarias: distribuciones de personas, distribuciones del uso de luces, distribuciones de control de los sistemas de refrigeración, calefacción, ventilación, etc. todas estas descripciones necesitan un listado de datos, el cual puede almacenarse en el formato que tiene el Xrecord.



**Figura 118: Ubicación del elemento Xrecord en el formato dxf.**

A la hora de trabajar los documentos que contengan mucha información es necesario agilizar el proceso de búsqueda de los datos necesarios. Para ello en el dxf aparecen unos objetos llamados Dictionary (diccionarios). Los diccionarios son elementos de la sección objetos que almacenan etiquetas con el nombre y el identificador de cada elemento. La búsqueda de cualquier elemento es más rápida si se utiliza un diccionario ya que éste muestra el identificador del elemento buscado en el caso de que exista y se evita el tener que buscar uno a uno los elementos existentes.

#### **6.4. LIBRERÍA DIME**

Para la comunicación con un entorno CAD utilizamos los archivos con formato dxf. Este formato es un estándar internacional el cual utilizan muchos programas de dibujo CAD, como por ejemplo AutoCAD. Para la lectura y escritura en este formato se utiliza una librería en lenguaje C++ llamada DIME desarrollada por la empresa noruega Systems In Motion. La librería de clases dime está creada en lenguaje C++ y tiene como objetivos leer, construir, manipular y escribir en formato dxf. El nombre es el acrónimo de dxf Import, Manipulation, and Export library.

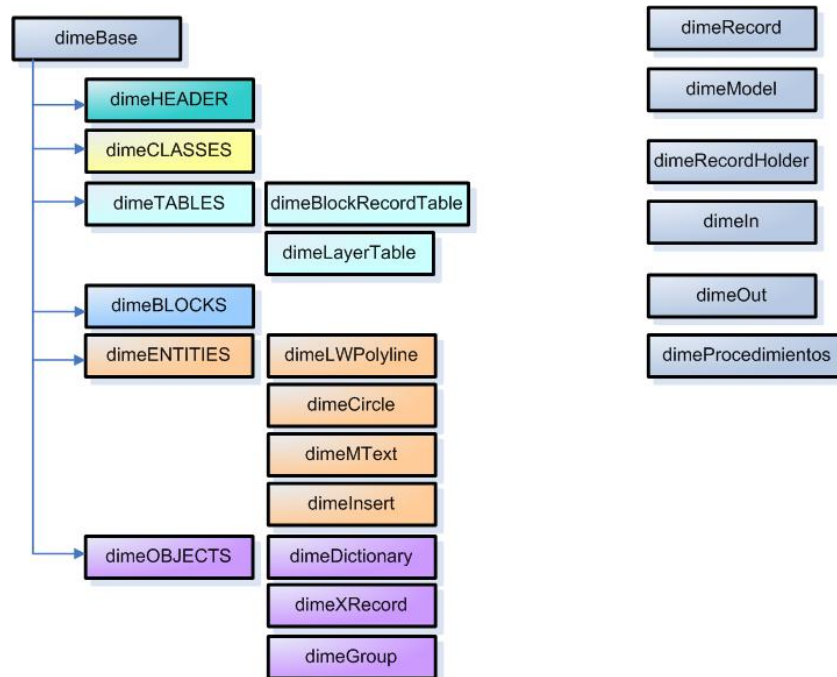
La librería permite ser utilizada en cualquier plataforma de compilación de lenguaje C++. Está desarrollado para ser compilado tanto en Win32 como en Linux, IRIX, HP-UX, Solaris, BeOs y MacOS.

Entre sus características destacamos:

- Cargar archivos dxf en la librería y reconocerlos como objetos ordenados en una jerarquía de clases,
- Facilidad para la extracción de datos geométricos contenidos en el archivo dxf, según el tipo de objeto que estemos tratando,
- Manipulación de la librería ,
- Facilidad para insertar y cambiar datos de los objetos contenidos en el documento,
- Estructura jerárquica bien diseñada que permite ampliarse y adaptarse para la finalidad que se busca.

La estructura ha sido diseñada para soportar todas las versiones pasadas y las futuras de archivos con formato dxf. Ha sido probada con versiones desde 10 a 14 y con archivos AutoCAD 2000 DXF.

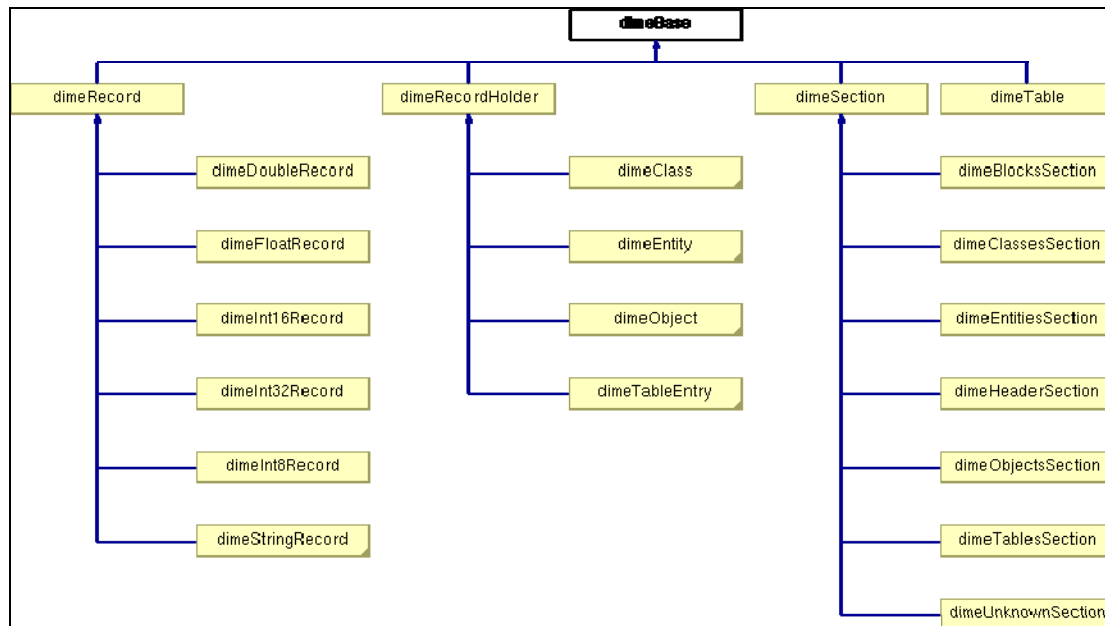
La librería está definida básicamente para la lectura y escritura de archivos dxf. Las clases que tiene definida se centran en el reconocimiento de elementos del archivo, sobretodo en la parte geométrica del mismo. Por este motivo la librería ha sido ampliada para adaptarla mejor a la función que se había propuesto en el trabajo, manipular información de una aplicación térmica (información no geométrica).



**Figura 119:** Esquema de la jerarquía que aparece en la librería dime.

La librería define una serie de clases para describir los objetos que forman el edificio, a continuación se comentan algunas de las más importantes:

- La clase dimeInput, contiene la ruta del archivo dxf e instrucciones para su lectura y manipulación.
- La clase dimeOutput, contiene la ruta del archivo dxf e instrucciones para poder escribir el mismo.
- La clase dimeBasic, contiene una serie de definiciones y macros que se utilizan en el proyecto.
- La clase dimeModel, es la clase más importante de la librería ya que contiene el patrón de la información leída en el archivo dxf, las secciones y los parámetros generales del mismo.
- La clase dimeBase, en esta clase se especifican los posibles tipos de objetos que aparecen en la librería.
- La clase dimeRecordHolder, es un manejador de memoria específico que puede ser utilizado para mejorar las prestaciones del sistema.

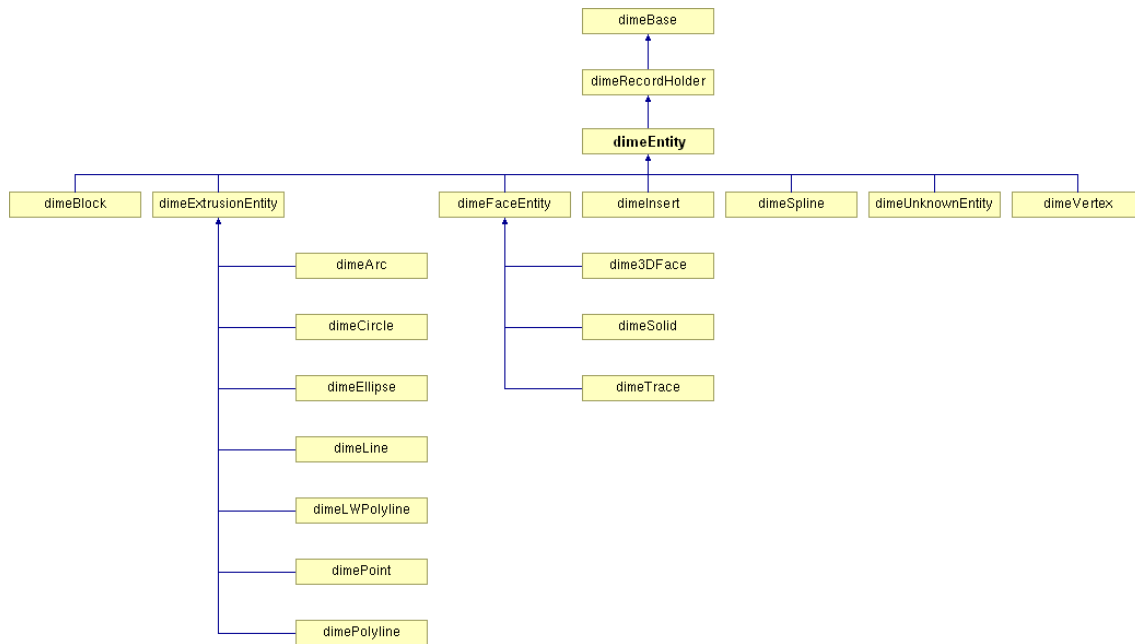


**Figura 120: Ejemplo de la jerarquía de objetos que descienden de la clase dimeBase en la librería DIME**

En la figura anterior se desglosa la clase dimeBase y los elementos que descienden de la misma. Como se observa existen cuatro grupos distintos de elementos, en el primer grupo de la izquierda aparece la clase dimeRecord con seis subgrupos descendiendo de la misma. Al describir el formato del archivo dxf se ha comentado que es un formato de etiquetas, cada dato está compuesto por dos valores, el primero es el “group code” que indica el tipo de dato y su significado según el contexto en el que está, y el segundo dato es el valor de la variable. Esta dualidad se conoce en el archivo como record, por lo que la clase dimeRecord contiene estos dos valores y su tipo.

El segundo grupo tiene como cabecera la clase dimeRecordHolder y de ella descienden las clases dimeClass, dimeEntity, dimeObject y dimeTableEntry. Al realizar la lectura del archivo, por defecto los elementos se almacenan en un objeto del tipo dimeRecordHolder el cual tiene las funciones de leerlos, y escribirlos. En el caso en que un elemento tenga la estructura de una entidad, o clase, o tableEntry u objeto, entonces éste pasa a ser uno de estos tipos que contienen sus propias funciones de manipulación de los mismos. Las clases dimeClass, dimeObject y dimeTableEntry están relacionadas con información no geométrica, mientras que en los objetos de la clase dimeEntity se almacena la información geométrica del documento.

El grupo que encabeza la clase dimeSection representa las distintas secciones que componen el documento dxf. Existen seis secciones en el documento dxf y cada una de ellas posee una clase para definirla y poder manipularla. Además se ha añadido una clase nueva genérica llamada dimeUnknownSection la cual representa una nueva sección que pueda existir en el documento y que no se reconoce por la librería. Como el formato del dxf puede ser modificado, en posteriores versiones pueden aparecer nuevas secciones, con el uso de la clase genérica se permite reconocer el nuevo formato sin tener que cambiar la librería. El último grupo representa las tablas, que son elementos donde se definen las capas del dibujo, los bloques, tipos de líneas utilizados, etc.



**Figura 121: Estructura jerárquica de la clase dimeEntity.**

La clase dimeEntity es la clase que representa a todos los elementos gráficos que aparecen en el documento dxf. En la figura anterior se representa la estructura jerárquica de la misma, en lenguaje de programación por objetos esto significa que un elemento del tipo dimeEntity es también y de forma más concreta de uno de los tipos que aparecen debajo de la misma. Así, los elementos como arcos (dimeArc), círculos (dimeCircle), líneas (dimeLine) o polilíneas (dimeLWPolyline) son del tipo dimeEntity pero con unas propiedades concretas y específicas de cada uno que su clase en concreto es la que reconoce y maneja.

## 6.5. ADAPTACIÓN DE LA LIBRERÍA DIME PARA UNA APLICACIÓN TÉRMICA

Como se ha comentado, la librería inicialmente estaba implementada para reconocer y manipular los elementos básicos del archivo dxf, pero no se especificaba ninguna clase para manipular información referente a aplicaciones. Utilizar el formato dxf para el intercambio de información entre una aplicación gráfica y otra no gráfica requiere el uso de nuevos elementos del archivo que no habían sido definidos en la estructura original de la librería. Por este motivo la librería dime ha sido adaptada añadiendo nuevos componentes y modificando algunos existentes con la finalidad de adaptarse al intercambio de información térmica entre la aplicación CAD y el programa de simulación térmica de edificios vpCLIMA. En este apartado se describen algunos de los cambios incorporados a la jerarquía de clases dime con la finalidad de intercambiar información con la aplicación térmica.

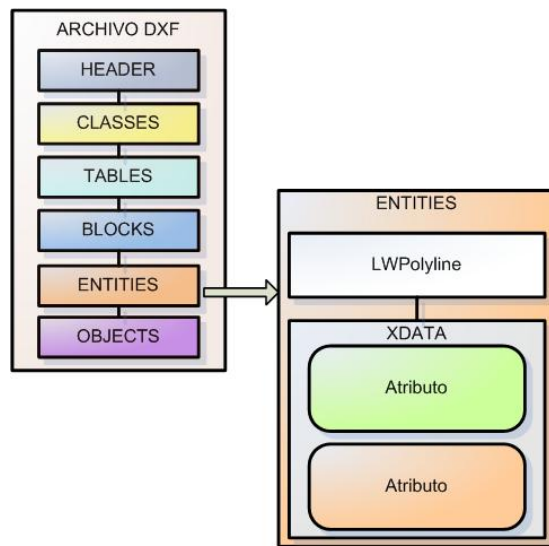
### 6.5.1. XDATA

Existen dos elementos pensados en el formato dxf para poder intercambiar información entre aplicaciones y que ya se han comentado en capítulos anteriores. Por un lado existen los elementos Xdata, que representan datos extendidos de elementos



gráficos del documento. Los datos extendidos de una entidad gráfica nos puede indicar lo que esa entidad representa en otra aplicación. Por ejemplo, los cerramientos de la aplicación térmica se representan gráficamente como polilíneas en el documento. Para poder saber qué polilíneas representan una pared exterior, una interior, o cualquier otro tipo de elemento utilizamos los datos extendidos. Los datos extendidos son por lo tanto valores añadidos asociados siempre a un elemento del archivo.

Los datos extendidos no pueden colocarse en cualquier elemento del archivo dxf, se añaden sólo en las entidades que lo permiten. Los elementos que admiten los Xdata son aquellos que pertenecen a la sección Entities, Objects y Blocks. Además este tipo de datos se colocan en el archivo al final del elemento al que complementan. Un mismo elemento puede contener varios Xdata, cada uno llevará indicado en nombre de la aplicación a la que pertenece. Los elementos Xdata utilizan unos group codes especiales y tienen un formato particular, en el siguiente esquema se muestra como aparece dos Xdata añadidos a una entidad genérica.



```

0
<tipo de entidad>
5
<handle>
330
<puntero>
100
AcDbEntity
8
<layer>
100
AcDb<nombre de clase>
.
<datos entidad>
.
1001
<Nombre Aplicación 1>
.

```

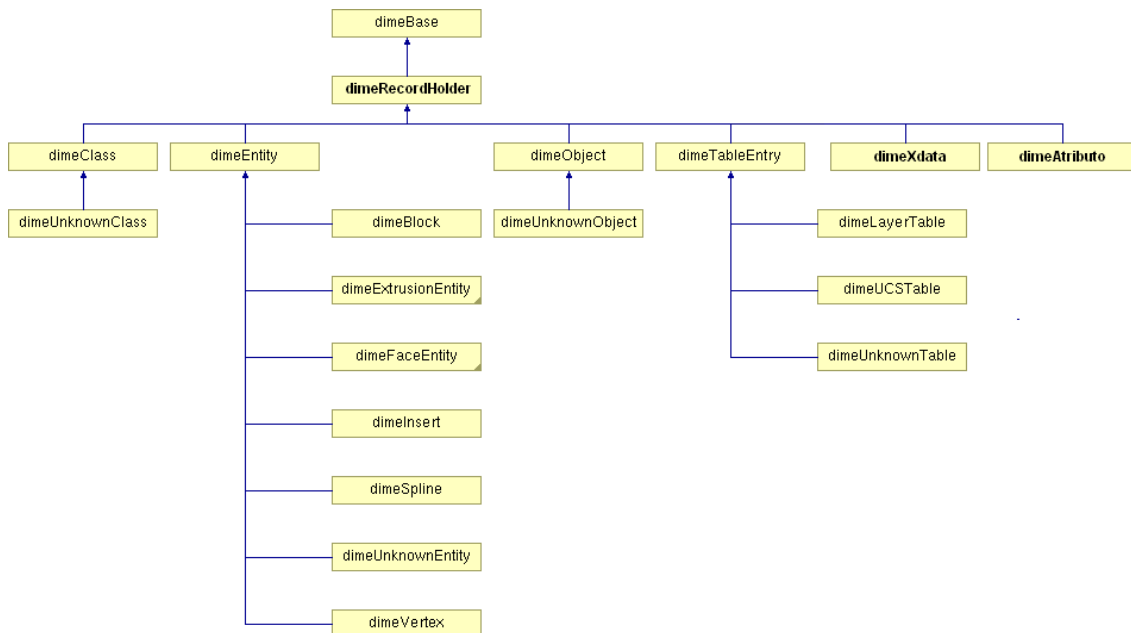
```

<datos extendidos>
.
1001
<Nombre Aplicación 2>
.
<datos extendidos>
.

```

**Figura 122: Formato del elemento Xdata añadido a una entidad genérica.**

Para poder trabajar con elementos Xdata en la aplicación se ha añadido a la jerarquía de la librería dime una nueva clase de objetos llamada dimeXdata. Esta nueva clase aparece como descendiente del elemento dimeRecordHolder ya que este elemento tiene funciones de almacenamiento y escritura de elementos que no reconoce la librería. Durante el proceso de lectura e interpretación del archivo dxf, cuando se leen entidades, objetos o tablas y aparece el código de grupo 1001, se prepara para la lectura de un dato extendido.



**Figura 123: esquema jerárquico de la clase dimeBase con las dos clases incorporadas dimeXdata y dimeAtributo.**

El valor que acompaña al código de grupo 1001 es la cadena “VPCLIMA”, que es el nombre de la aplicación térmica que estamos describiendo. Para organizar la información dentro de los Xdata se han creado unas estructuras propias de datos, que es con la que interoperan los dos programas. La información contenida dentro del Xdata se organiza por Atributos, de manera que un mismo Xdata puede contener varios atributos. Con ello se pueden definir varias características para un elemento en una aplicación, por ejemplo, una polilínea puede contener en sus datos extendidos de la misma aplicación (VPCLIMA) un atributo que especifique el tipo de muro que es (muro exterior, techo exterior, etc. ) y otro atributo que especifique los valores de soleamiento precalculados en otra aplicación. La clase que define los atributos tiene el nombre de dimeAtributo y en la jerarquía de la librería desciende de la clase dimeRecordHolder.

## 6.5.2. CERRAMIENTOS

Los atributos describen básicamente la función que tiene una determinada entidad gráfica del documento en el programa de análisis térmico. Por tanto se han creado multitud de atributos para poder definir los distintos elementos existentes. A continuación se muestra un listado de los atributos creados para la aplicación y que se aplican sobre las entidades polilíneas para representar cerramientos:

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoME**

*Función:*

clase que estructura la información de los muros exteriores

*Información geométrica:*

dxfdouble SuperficieNeta;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;  
dxfdouble AngIncli;  
dxfdouble AngOrient;  
char \*Orient;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

dxfdouble DNILocal;  
char \*identificador;  
dxfdouble SolSombra;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIPost;  
dxfdouble Numero;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoMI**

*Función:*

clase que estructura la información de los muros interiores

*Información geométrica:*

dxfdouble SuperficieNeta;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;  
dxfdouble Sentido;  
dxfdouble AngOrient;  
char \*Orient;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

char \*identificador;  
dxfdouble DNIHermano;  
dxfdouble DNILocal;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIPost;  
dxfdouble Numero;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoMO**

*Función:*

clase que estructura la información de los muros en contacto con un local vecino exterior al proyecto

*Información geométrica:*

dxfdouble SuperficieNeta;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoMT**

*Función:*

clase que estructura la información de los muros en contacto con el terreno

*Información geométrica:*

dxfdouble DatoSuperficie;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble AltoL;  
dxfdouble AnchoL;

dxfdouble Sentido;  
dxfdouble AngOrient;  
dxfdouble DatoSuperficie;  
char \*Orient;

*Información no geométrica:*

char \*identificador;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIHermano;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIPost;  
dxfdouble Numero;

dxfdouble Sentido;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIHermano;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble Ls,Lpi,Lpe,alfa,beta;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoTE**

*Función:*

clase que estructura la información de los techos exteriores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble SuperficieNeta;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble AngIncli;  
dxfdouble AngOrient;  
char \*Orient;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble DatoSuperficie;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble SolSombra;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoTI**

*Función:*

clase que estructura la información de los techos interiores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble DNIHermano;  
char \*PorCapa;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoTO**

*Función:*

clase que estructura la información de los techos en contacto con un local vecino exterior al proyecto

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoTT**

*Función:*

clase que estructura la información de los techos en contacto con el terreno (azotea ajardinada)

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble DatoSuperficie;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble Perimetro;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIHermano;  
dxfdouble factorCorreccionCTE\_b;

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIHermano;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoSE**

*Función:*

clase que estructura la información de los suelos exteriores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoSI**

*Función:*

clase que estructura la información de los suelos interiores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble DNIHermano;  
char \*PorCapa;

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoSO**

*Función:*

clase que estructura la información de los suelos en contacto con un local vecino

*Tipo de atributo:*

**dimeCerramientoST**

*Función:*

clase que estructura la información de los suelos en contacto con el terreno

exterior al proyecto (ó vacíos sanitarios)

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble DatoSuperficie;  
dxfdouble Perimetro;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIHermano;  
dxfdouble factorCorreccionCTE\_b;  
dxfdouble Ls,Lpi,Lpe,alfa,beta;

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble DatoSuperficie;  
dxfdouble Perimetro;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNIHermano;  
dxfdouble Ls,Lpi,Lpe,alfa,beta;

### 6.5.3. HUECOS

La representación de huecos se realiza mediante el uso de entidades de tipo insert. La razón de utilizar esta entidad se debe a que los huecos se representan en el documento como bloques, los xdata del bloque poseen los valores comunes de composición, vidrio, marco, etc.

*Tipo de atributo:*

**dimeVentanaE**

*Función:*

clase que estructura la información de las ventanas exteriores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;

*Información no geométrica:*

dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIMuro;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble Niguales;  
char \*PorCapa;

*Tipo de atributo:*

**dimeVentanaI**

*Función:*

clase que estructura la información de las ventanas interiores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;

*Información no geométrica:*

dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIMuro;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble Niguales;  
dxfdouble DNIHermano;  
char \*PorCapa;

*Tipo de atributo:*

**dimePuertaE**

*Función:*

clase que estructura la información de las puertas exteriores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;

*Información no geométrica:*

dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIMuro;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble Niguales;

*Tipo de atributo:*

**dimePuertaI**

*Función:*

clase que estructura la información de las puertas interiores

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble AltoL;

*Información no geométrica:*

dxfdouble DNILocal;  
dxfdouble DNIMuro;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble Niguales;  
dxfdouble DNIHermano;  
char \*PorCapa;

*Tipo de atributo:*

**dimeClaraboya**

*Función:*

clase que estructura la información de las claraboyas

*Información geométrica:*

dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble LargoL;

*Información no geométrica:*

dxfdouble DNIMuro;  
dxfdouble DNIPost;  
char \*identificador;  
dxfdouble Niguales;  
char \*PorCapa;  
dxfdouble DNILocal;

#### 6.5.4. LOCALES

Para la representación de los locales que forman el edificio en el documento CAD se utilizan los elementos llamados GROUP. Un grupo es un conjunto de entidades que unidas representan un elemento de orden mayor. El tipo de unión entre las entidades no es geométrico, por lo que cualquiera de ellas pueden modificar su posición relativa respecto a las demás, puede modificar también su tamaño, su forma, etc. sin que se altere la unión del grupo. Cada local en la aplicación se define como un grupo en el documento dxf y añadimos datos extendidos a este grupo para añadir la información térmica del local que se utiliza en el programa VPCLIMA. A continuación se comenta parte de la información del atributo dimeLocal que se añade a los grupos y que guarda la información de éste en el documento.

*Tipo de atributo:*

**dimeLocal**

*Función:*

clase que estructura la información de los locales

*Información geométrica:*

dxfdouble AltoL;  
dxfdouble AnchoL;  
dxfdouble LargoL;  
dxfdouble SuperficieL;  
dxfdouble DatoSuperficie;

*Información no geométrica:*

dxfdouble Niguales;  
char \*Identificador;  
dxfdouble DNIPost;  
dxfdouble DNIPlanta;  
dxfdouble DNIZonaPost;  
dxfdouble DNIZona;

*Distribuciones cálculo de cargas*

char \*DistriOcupantes;  
char \*DistriLuces;  
char \*DistriOC;

*Distribuciones simulación térmica*

char \*TipoVentilacion;  
char \*ControlVentilacion;  
char \*DemandaUso;  
char \*DemandaControl;

*Otros datos*

dxfdouble ActividadOcupantesL;  
char \*TipoMueblesL;  
dxfdouble CantidadMuebles;  
char \*AcabadoSueloL;



### 6.5.5. CONTORNO

En la nueva aplicación de análisis térmico de edificios se requiere definir los elementos que forman el contorno del edificio, como locales vecinos, terreno, etc. Todos estos tipos de elementos se definen también como grupos, ya que son la unión de varias entidades y poseen sus correspondientes atributos en los datos extendidos para cada tipo de elemento. Los tipos de contornos existentes que se han desarrollado en la aplicación son los siguientes:

- Local habitable acondicionado
- Local habitable no acondicionado
- Local no habitable
- Local a una temperatura conocida
- Terreno
- Vacío sanitario

Para poder intercambiar los datos relacionados con los contornos mediante el formato dxf se han creado una serie de atributos que se añaden al objeto grupo que los define. A continuación se muestran estos atributos y las propiedades más características de los mismos.

<p><i>Tipo de atributo:</i> <b>dimeVecino</b></p> <p><i>Función:</i> clase que estructura la información de los locales vecinos</p> <p><i>Información geométrica:</i> dxfdouble AREAVEC;</p> <p><i>Información no geométrica:</i> char *Nombre; char *Identificador; dxfdouble DNIPost; dxfdouble Numero;</p> <p><i>Características</i> char *DatosLocal; char *NivelEstanqueidad; char *AislaVecino;</p> <p><i>Información instalación</i> dxfdouble TVLVEC; dxfdouble TILVEC; char *TipoLocal;</p>	<p><i>Tipo de atributo:</i> <b>dimeTerreno</b></p> <p><i>Función:</i> clase que estructura la información del terreno que está en contacto con el edificio</p> <p><i>Información geométrica:</i> dxfdouble PROFUNDIDAD;</p> <p><i>Información no geométrica:</i> dxfdouble Numero; char *Nombre; char *Identificador; dxfdouble DNIPost;</p>	<p><i>Tipo de atributo:</i> <b>dimeVacíoSanitario</b></p> <p><i>Función:</i> clase que estructura la información del vacío sanitario del proyecto</p> <p><i>Información geométrica:</i> dxfdouble Eh; dxfdouble Ez;</p> <p><i>Información no geométrica:</i> char *Nombre; char *Identificador; dxfdouble DNIPost;</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Todos estos elementos definidos como atributos descienden de la clase dimeAtributo, que es una clase virtual. Por lo tanto las funciones y variables comunes en todos ellos se definen en esta clase. Cada una de las clases descendientes, por la propiedad de herencia, adquieren estas mismas características y añaden otras específicas para el tipo de elemento que definen.

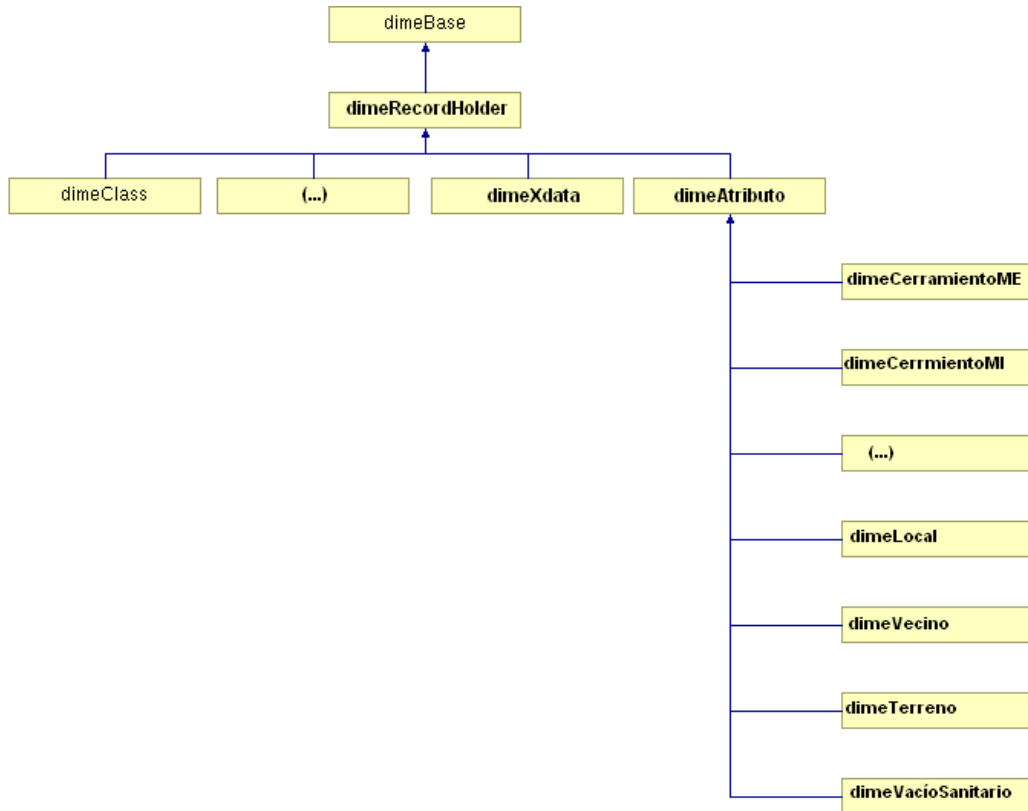


Figura 124: Esquema jerárquico de la clase dimeAtributo y sus descendientes.

### 6.5.6. CAPAS

Además de las polilíneas, los inserts y los grupos, existen otro tipo de elementos a los que se han añadido más propiedades extendidas, se trata de las capas. En la aplicación que se ha creado, la propiedad de las capas es fundamental, ya que cada una de las entidades, al ser creada se le asigna una capa determinada.

En el caso de las polilíneas que representan cerramientos, la capa indica la función estructural que posee dicho cerramiento y la composición del mismo. La función estructural viene representada en el nombre de la capa. Por ejemplo, un nombre es “ME\_VPCLIMA”, el prefijo ME indica que se trata de un cerramiento que tiene la función de Muro Exterior, mientras que el sufijo VPCLIMA indica que la capa pertenece a la aplicación que se está desarrollando, la cual posee el mismo nombre.

La manera de introducir la composición que representa cualquier capa se realiza mediante la adición de datos extendidos. En este caso los datos son más simples ya que la capa solamente posee el nombre identificativo de la misma. La definición de la composición se almacena en los elementos Xrecord.

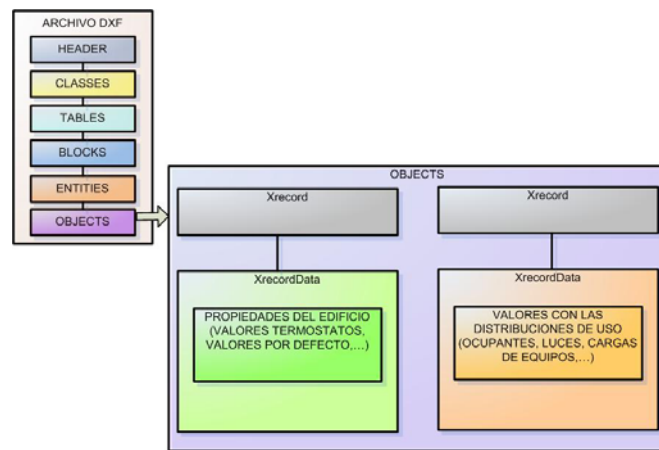
### 6.5.7. XRECORD Y XRECORDDATA

Otro elemento utilizado para almacenar información es el tipo de objeto Xrecord. El Xrecord es un objeto que puede considerarse como un almacén de información, de manera que se pueden almacenar una gran cantidad de datos siempre que se respete el uso de los códigos de grupo designados para el objeto y para cada tipo de dato que se vaya a utilizar.

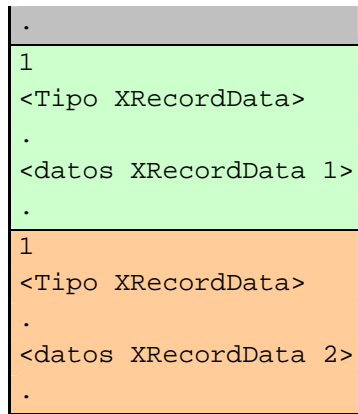
Para ordenar la información en nuestra aplicación térmica, se han generado una serie de elementos dentro de los Xrecord en los que se almacena información referente a los tipos de elementos que representan, se trata de los XRecordData. Por ejemplo existe en el documento un Xrecord que guarda la información general del edificio, referente a la aplicación térmica que desarrollamos. Éste XRecordData tiene el nombre de PropiedadesEdificio y la clase que los describe es se llama dimePropiedadesEdificio.

En primer lugar se ha creado la clase dimeXRecordData, que es una clase genérica, en programación se llama virtual, ya que no se crea ningún objeto concreto a partir de esta clase sino que es un modelo para las clases descendientes. La clase dimeXrecordData desciende de la clase dimeRecordHolder, igual que las clases dimeXdata y dimeAtributo. La clase dimeRecordHolder tiene la propiedad de leer y escribir los records que no se interpretan en las clases descendientes, por este motivo éstas tres clases descienden de la misma.

En la siguiente figura se muestra un esquema del archivo dxf donde aparecen los elementos citados anteriormente, también se adjunta en formato genérico la parte del documento que representa un elemento Xrecord junto con dos XrecordData.



```
0
XRECORD
5
<handle>
330
<puntero>
100
AcDbXrecord
.
<datos entidad>
```



**Figura 125: Representación de los elementos Xrecord dentro de la sección de Objects y de los XrecordData dentro de los Xrecord.**

Por lo que respecta al formato empleado para los XrecordData, así como los Xdata son elementos establecidos en la estructura dxf y tienen un código de grupo inicial que es el 1001, esto no sucede para los XRecordData. Los XrecordData son estructuras creadas para la aplicación térmica y por tanto el formato ha sido escogido con menos restricciones. En el esquema anterior se observa que cada uno de los XrecordData que posee la entidad Xrecord se inicia con el código de grupo 1 seguido de una cadena de caracteres que indica el tipo de elemento que se trata.

### 6.5.8. ZONAS, PLANTAS Y EDIFICIO

En la librería se han definido diversos tipos de elementos XRecordData, a continuación mostraremos qué elementos se definen con este tipo de objetos y como se estructuran. Las zonas, las plantas y el edificio son conceptos que no poseen una entidad gráfica en el documento, por tanto no se pueden definir como datos extendidos de ninguna entidad. Pero en nuestra aplicación térmica se necesita definir una serie de propiedades de cada uno de ellos, por lo que se ha decidido utilizar los Xrecords para almacenar esta información. Los elementos del edificio que se definen en objetos XrecordData son:

- Propiedades del edificio
- Zonas
- Plantas

Estos elementos guardan sus datos en las clases que se definen a continuación y que pertenecen a la librería dime, todas estas descienden de la clase dimeXRecordData:

<p><i>Tipo de XrecordData:</i> <b>dimeZona</b></p> <p><i>Función:</i> clase que estructura la información de las zonas</p> <p><i>Información no geométrica:</i> dxfdouble Niguales;</p>	<p><i>Tipo de XrecordData:</i> <b>dimePropiedadesEdificio</b></p> <p><i>Función:</i> clase que estructura la información general del edificio</p> <p><i>Información no geométrica:</i> char *Capital;</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

char \*Identificador;  
dxfdouble DNIPost;  
dxfdouble DNIZonaPost;  
dxfdouble Numero;  
char \*Nombre;

*Información distribuciones:*

char \*DistriOcupantes;  
char \*DistriLuces;  
char \*DistriOC;  
dxfdouble FSOcupantesZ;  
dxfdouble FSLucesZ;  
dxfdouble FSOCZ;  
char \*BOOcupantesZ;  
char \*BOLucesZ;  
char \*BOOCZ;

*Información equipos e instalación:*

char \*TipoVentilacion;  
char \*ControlVentilacion;  
char \*TipoRecuperador;  
char \*EfiRecuperador;  
char \*ExtVent;  
char \*EfiHumectador;  
dxfdouble TimpCalefZ;  
dxfdouble TimpRefriZ;  
double Totroequipo,Wotroequipo;  
double TotroequipoInv,WotroequipoInv;  
dxfdouble CoefSeg;  
dxfdouble CoefInst;

char \*LocalidadD;  
dxfdouble AltitudD;  
dxfdouble LatitudD;  
char \*ZonaD;  
char \*LocalidadC;  
dxfdouble AltitudC;  
dxfdouble LatitudC;  
char \*Version;  
char \*Fecha;  
char \*Empresa;  
char \*Autor;  
char \*Referencia;  
char \*Titulo0;

*Información distribuciones:*

char \*DistriOcupantesL;  
char \*DistriLucesL;  
char \*DistriOCL;  
dxfdouble FSOcupantesZ;  
dxfdouble FSLucesZ;  
dxfdouble FSOCZ;

*Información equipos e instalación:*

char \*TipoVentilacionZ;  
char \*ControlVentilacionZ;  
char \*TipoRecuperadorZ;  
char \*EfiRecuperadorZ;  
char \*ExtVentZ;  
char \*EfiHumectador;  
dxfdouble TimpCalefZ;  
dxfdouble TimpRefriZ;  
dxfdouble CoefSegL;  
dxfdouble CoefInstL;  
dxfdouble TVL;  
dxfdouble HVL;  
dxfdouble TIL;  
dxfdouble HIL;

*Tipo de XrecordData:*

**dimePlanta**

*Función:*

clase que estructura la información de las planas

*Información no geométrica:*

dxfdouble Numero;  
char \*Nombre;  
char \*Identificador;  
dxfdouble DNIPost;  
dxfdouble Niguales;

### 6.5.9. COMPOSICIONES

Como se había comentado anteriormente, las capas contienen el identificador de la composición que representan, pero la definición de la misma se encuentra en un elemento Xrecord. Para almacenar este tipo de composición existen dos tipos de XrecordData, uno que estructura la información de los cerramientos y otro que hace lo mismo en los huecos, ventanas, puertas y claraboyas. A continuación se muestran algunas de las variables de estas dos clases que en la estructura de la librería se han creado descendiendo de la clase dimeXrecordData.

*Tipo de XrecordData:*

#### **dimeMuro**

*Función:*

clase que estructura la información de las composiciones de los muros

*Información identificación:*

char \*Identificador;  
char \*Nombre;  
char \*Path;  
char \*Subtipo;  
char \*QueEs2;

*Información térmica:*

dxfdouble U;  
dxfdouble Peso;  
dxfdouble Resisvapor;  
dxfdouble NumeroC;  
dxfdouble He;  
dxfdouble Hi;  
char \*Mctv;  
char \*Color;  
dxfdouble CoefAbsor;  
dxfdouble ELongAisla;  
dxfdouble EResistAisla;

*Información identificación capas:*

char \*Capa;  
char \*Inj;  
char \*Dibu;  
char \*Grupo;  
char \*CTE;  
char \*IniIVE;  
char \*Aplicacion;  
char \*Material;

*Información térmica capas:*

dxfdouble Espesor;  
dxfdouble K;  
dxfdouble Cp;

*Tipo de XrecordData:*

#### **dimeHueco**

*Función:*

clase que estructura la información de las composiciones de los huecos

*Información identificación:*

char \*Nombre;  
char \*Identificador;  
char \*QueEs2;

*Información geométrica:*

dxfdouble Altura;  
dxfdouble Anchura;

*Información térmica:*

char \*Carpinteria;  
char \*FamiliaCarpinteria;  
char \*Cristal;  
char \*FamiliaCristal;  
char \*ColorCristal;  
dxfdouble FactorSolarCristal;  
dxfdouble Espesor1;  
dxfdouble EspesorCamara;  
dxfdouble Espesor2;  
dxfdouble K;  
dxfdouble Nvi;  
variables aleros y voladizos de sombra

dxfdouble Den; dxfdouble Resist; dxfdouble Resisv;	
----------------------------------------------------------	--

Destacar que la clase que define la composición de los muros posee en su interior un vector de capas. La composición de un cerramiento suele ser un conjunto de capas de materiales, y cada uno de ellos posee unas características distintas. Todos estos datos se guardan en un objeto dimeMuro. En el caso de la clase dimeHueco hay que comentar que en ella se guarda tanto la información referente a la carpintería del hueco como la que tiene que ver con el vidrio, la clase dimeHueco representa todo el conjunto.

### 6.5.10. DISTRIBUCIONES

Las distribuciones son los objetos que más datos poseen en el documento. Los valores que guardan son los que representan hora a hora la ocupación de los locales, la conexión de las luces, el uso de otros elementos generadores de calor. Además las distribuciones indican el horario de funcionamiento de los equipos. Todos estos datos se almacenan en forma de vector de valores dobles, y se accede a dichos datos mediante el identificador que posee cada horario.

*Tipo de XrecordData:*

**dimeXRVector**

*Función:*

clase que estructura la información de las distribuciones

*Identificación:*

char\* Identificador;  
char\* XRVectorName;

*Datos:*

vector valores;

## 6.6. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

Ref. 28

<http://doc.coin3d.org/dime/index.html>

Ref. 29

[www.autodesk.com/techpubs/autocad/acad2000/dxf/](http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acad2000/dxf/)

## **7. ESTRUCTURA ORIENTADA A OBJETOS DE LA INFORMACIÓN TÉRMICA DEL EDIFICIO**

La programación por objetos permite crear modelos y estructuras jerárquicas de información. Esta característica es importante a la hora de implementar una estructura conceptual como la de un edificio en la que existen distintos niveles de detalle. Elementos como cerramientos y huecos pertenecen a niveles más bajos de la estructura, mientras que las zonas, plantas o el edificio en conjunto se sitúan en el nivel jerárquico superior. La programación orientada a objetos permite estructurar la información de una manera jerárquica y ordenada, estableciendo la correspondiente relación entre los distintos elementos que forman el sistema edificio. En el siguiente capítulo trataremos de describir la estructura que se ha empleado a la hora de definir el edificio como un sistema de información.

### **7.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PROGRAMACIÓN ORIENTADA A OBJETOS (POO)**

La programación orientada a objetos es una metodología particular para crear aplicaciones informáticas. El origen de este tipo de metodología está íntimamente ligado a entornos de simulación, por lo que su estructura fue creada con esta visión. De hecho, los conceptos de la programación orientada a objetos tienen origen en Simula 67, un lenguaje diseñado para hacer simulaciones, creado por Ole-Johan Dahl y Kristen Nygaard del Centro de Cómputo Noruego en Oslo. Al parecer, en este centro, trabajaban en simulaciones de naves.

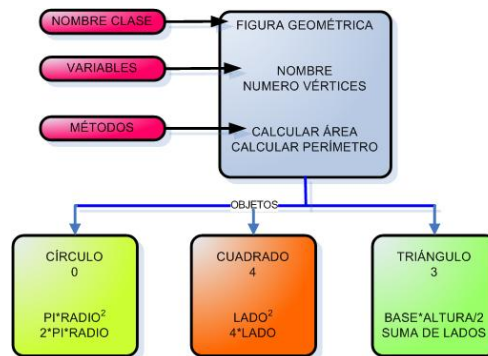
La programación orientada a objetos tomó posición como el estilo de programación dominante a mediados de los años ochenta, en gran parte debido a la influencia de C++, una extensión del lenguaje de programación C. El elemento básico de este tipo de programación es el objeto. Los objetos son entidades que combinan tres características esenciales: estado, comportamiento y entidad.

Los objetos se crean de acuerdo con un modelo llamado clase, en donde se definen las variables que el objeto va a utilizar y las funciones que va a tener. Una clase es un tipo definido por el usuario que determina las estructuras de datos y las operaciones asociadas con ese tipo. Cada vez que se construye un objeto de una clase, se crea una instancia de esa clase. En general, los términos objetos e instancias de una clase se pueden utilizar indistintamente. Una clase es una colección de objetos similares y un objeto es una instancia de una definición de una clase (Figura 126: Representación de una clase llamada “figura geométrica” y tres objetos creados a partir de ésta en programación orientada a objetos.).

Los objetos son entidades que combinan estado, comportamiento e identidad. El estado son los valores que toman los datos propios de la entidad. Un objeto puede contener uno o varios datos el valor de los cuales define un estado en concreto de la entidad. El comportamiento está definido por los procedimientos o métodos con que puede operar dicho objeto, es decir, qué operaciones se pueden realizar con él. La identidad es una propiedad de un objeto que lo diferencia del resto, dicho con otras



palabras, es su identificador, al igual que el identificador de una variable o una constante.



**Figura 126: Representación de una clase llamada “figura geométrica” y tres objetos creados a partir de ésta en programación orientada a objetos.**

Un programa orientado a objetos es una colección de clases. Necesitará una función principal que cree objetos y comience la ejecución mediante la invocación de sus funciones miembro. Esta organización conduce a separar partes diferentes de una aplicación en distintos archivos. La idea consiste en poner la descripción de la clase para cada una de ellas en un archivo separado. La función principal también se pone en un archivo independiente. El compilador ensamblará el programa completo a partir de los archivos independientes en una única unidad.

En realidad, cuando se ejecuta un programa orientado a objetos, ocurren tres acciones:

- Se crean los objetos cuando se necesitan.
- Los mensajes se envían desde unos objetos y se reciben en otros.
- Se borran los objetos cuando ya no son necesarios y se recupera la memoria ocupada por ellos.

Las características más importantes que muestra la programación orientada a objetos son:

- Herencia

La herencia es la propiedad que permite a los objetos construirse a partir de otros objetos. Una clase se puede dividir en subclases. En C++ la clase original se denomina clase base; las clases que se definen a partir de la clase base, compartiendo sus características y añadiendo otras nuevas, se denominan clases derivadas. Las clases derivadas pueden heredar código y datos de su clase base añadiendo su propio código y datos a la misma. La herencia impone una relación jerárquica entre clases en la cual una clase hija hereda de su clase padre. Si una clase sólo puede recibir características de otra clase base, la herencia se denomina herencia simple. Si una clase recibe propiedades de más de una clase base, la herencia se denomina herencia múltiple.

- Polimorfismo

En un sentido literal, significa la cualidad de tener más de una forma. En el contexto de la programación orientada a objetos, el polimorfismo se refiere al hecho de que una misma operación puede tener diferente comportamiento en diferentes objetos. Por ejemplo, consideremos la operación sumar. El operador “+” realiza la suma de dos números de diferente tipo. Además se puede definir la operación de sumar dos cadenas mediante el operador suma.

- Abstracción

Denota las características esenciales de un objeto, donde se capturan sus comportamientos. Cada objeto en el sistema sirve como modelo de un "agente" abstracto que puede realizar trabajo, informar y cambiar su estado, y "comunicarse" con otros objetos en el sistema sin revelar cómo se implementan estas características. Los procesos, las funciones o los métodos pueden también ser abstraídos y cuando lo están, una variedad de técnicas son requeridas para ampliar una abstracción.

- Encapsulamiento

Significa reunir a todos los elementos que pueden considerarse pertenecientes a una misma entidad, al mismo nivel de abstracción. Esto permite aumentar la cohesión de los componentes del sistema.

## **7.2. VENTAJAS DE LA ESTRUCTURA MODULAR**

La programación orientada a objetos permite estructurar el código de las aplicaciones de manera ordenada e independiente unos procesos de otros. De esta manera se consigue estructurar un programa de manera modular, y esto implica que se pueden añadir nuevos módulos o que para modificar cualquier parte del código sea suficiente con actualizar un módulo y sustituirlo en el programa.

Esta manera de programar y de crear la aplicación es más ventajosa que la programación que se hacía anteriormente, conocida como código espagueti en donde el programa consistía en una serie de instrucciones colocadas una detrás de otra y cuya manipulación resultaba más laboriosa.

Se entiende por modularidad por tanto el proceso de crear partes de un todo que se integran perfectamente entre sí para que funcionen por un objetivo general, y a las cuales se les pueden agregar más componentes que se acoplen perfectamente al todo, o extraerle componentes sin afectar su funcionamiento. En el caso que se requiera actualizar un módulo, no hay necesidad de hacer cambios en otras partes del todo. Esto ayuda a la descomposición de problemas en subproblemas, es decir, a la solución de problemas por composición de soluciones a subproblemas.

### 7.3. TIPO DE CARGAS TÉRMICAS DE UN EDIFICIO

A la hora de analizar el flujo de energía que fluctúa en un sistema complejo como es un edificio aparecen una gran cantidad de agentes que es necesario analizar. En la siguiente figura se representan de una forma organizada por grupos los distintos factores que se deben tener en consideración. El edificio es un sistema en contacto con el ambiente exterior, por lo que ambos intercambian energía en un sentido u otro dependiendo de las condiciones que tienen cada uno en cada instante.

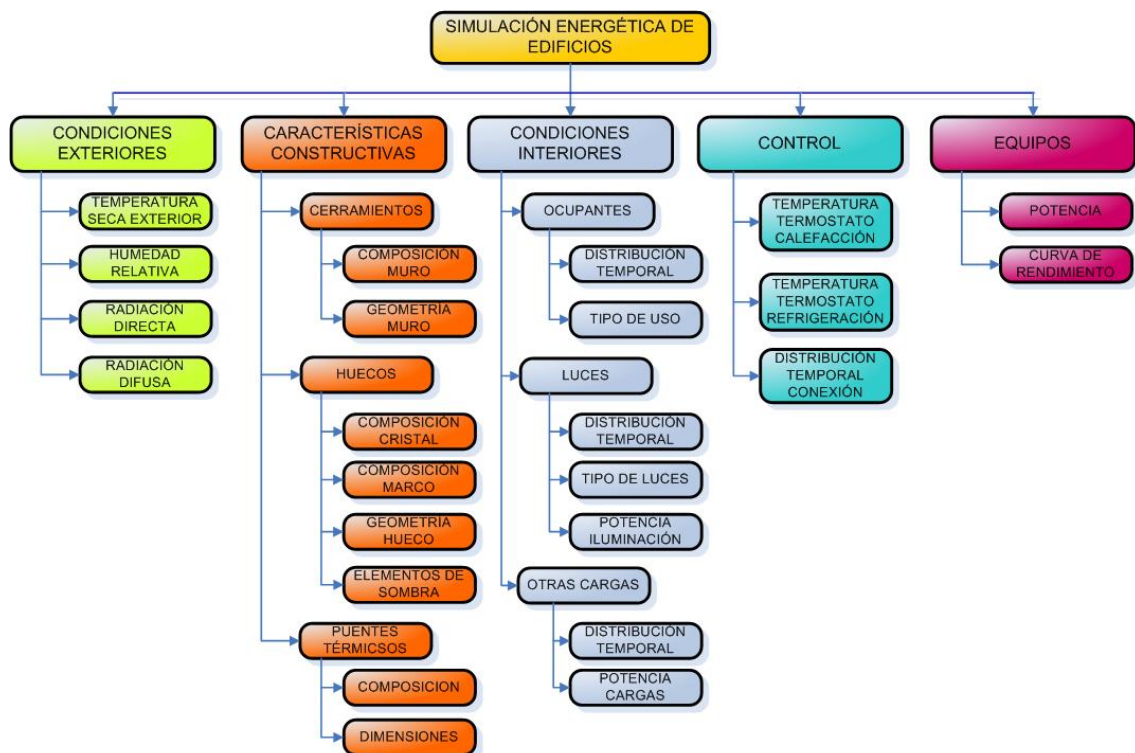


Figura 127: Agentes que influyen en las características térmicas del edificio.

La interacción con el ambiente exterior depende principalmente de dos grupos de los que están representados, el grupo de condiciones exteriores y el grupo de características constructivas del edificio. Es lógico pensar que la radiación solar es uno de los factores más influyentes en la carga térmica del edificio, y la radiación solar es una condición exterior, es decir, depende de la situación geográfica y climatológica de la zona.

Pero la influencia de la radiación sobre el edificio puede variar dependiendo de la geometría y la orientación del mismo. Dos edificios con la misma geometría recibirán una cantidad de radiación distinta por tener distintas orientaciones. Influye por tanto la orientación solar que tienen los cerramientos y la cantidad de superficie que existe en esta orientación.

Además de la orientación es muy importante la composición del cerramiento. Ante la misma excitación, el comportamiento de un muro frente a otro es distinto si ambos difieren en su composición.


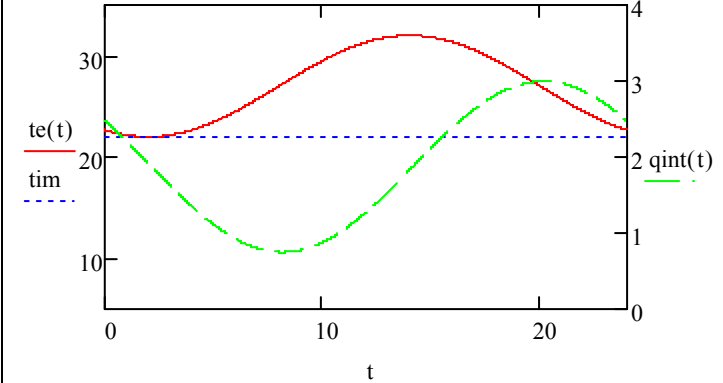
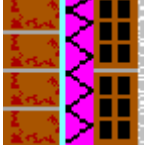
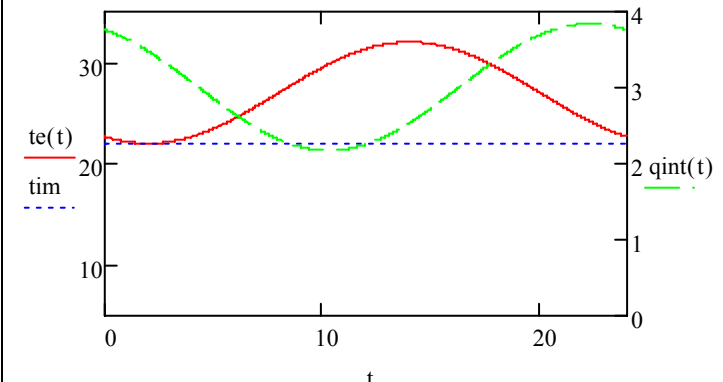
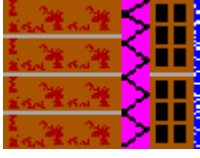
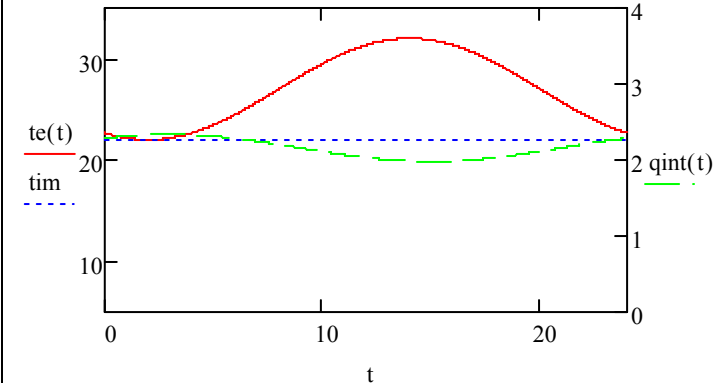
MURO	CARACTERÍSTICAS	RESPUESTA A EXCITACIÓN SENOIDAL
<b>Muro ligero</b> 	Conductividad: $U = 0.375 \frac{W}{m^2 K}$ Flujo máximo interior: $q_{int\_max} = 2.996 \frac{W}{m^2}$ Desfase horario: $desfase = 6.158 \text{ horas}$	
<b>Muro peso medio</b> 	Conductividad: $U = 0.602 \frac{W}{m^2 K}$ Flujo máximo interior: $q_{int\_max} = 3.841 \frac{W}{m^2}$ Desfase horario: $desfase = 8.296 \text{ horas}$	
<b>Muro pesado</b> 	Conductividad: $U = 0.432 \frac{W}{m^2 K}$ Flujo máximo interior: $q_{int\_max} = 2.337 \frac{W}{m^2}$ Desfase horario: $desfase = -11.038 \text{ horas}$	

Figura 128: Características térmicas para distintas composiciones de muros.

Los agentes que se han mencionado anteriormente aportan energía al interior en forma de carga sensible, es decir, influyen directamente en el incremento de temperatura del aire interior del volumen de cálculo. Pero también existen una serie de agentes internos que generan energía sobre el recinto de control. Estos agentes se clasifican en el grupo de condiciones interiores del esquema anterior, y en algunos casos además de aportar energía al aire que los rodea, aportan también humedad. Se trata de las personas que habitan el local y de algunos tipos de máquinas, las cuales, además de generar calor, generan vapor de agua, lo cual debe considerarse en el balance energético del ambiente.

## 7.4. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

A continuación se describe la estructura de la aplicación creada para la simulación térmica de un edificio en el programa VPCLIMA. Como se ha comentado, el programa trabaja con archivos DXF, permitiendo de esta manera la interoperabilidad con programas CAD. Pero esto no implica que la única forma de introducir los datos sea mediante este tipo de aplicaciones, en realidad, el uso del programa CAD se centra fundamentalmente en la introducción de la geometría del edificio.

Existen dos métodos de introducción de los datos del edificio en el programa, con o sin el uso de la herramienta CAD. Con la herramienta CAD se puede generar la geometría de los elementos del edificio, paredes exteriores, techos exteriores, etc. con lo cual después se puede hacer un análisis de sombras en el edificio. Si no se utiliza una herramienta CAD, se pueden introducir todos los elementos del edificio también, pero sin geometría, con lo que es imposible realizar un análisis de sombras del mismo. En el caso de introducir los elementos a través del programa, los únicos datos imprescindibles para los cálculos térmicos son las superficies de los cerramientos y las orientaciones de los mismos.

Para crear un archivo DXF desde una herramienta CAD con los elementos necesarios para la aplicación térmica VPCLIMA se ha desarrollado una macro que construye la geometría del edificio partiendo de los planos en dos dimensiones y que reconoce la función estructural de cada elemento para añadir al mismo los datos extendidos que contengan la información que requiere el programa. La macro está desarrollada en lenguaje Visual Basic y trabaja con la herramienta informática AutoCAD, el nombre de la macro es CADCLIMA.

Una macro es un programa que funciona interno en otro, en este caso la macro que se ha elaborado funciona dentro del programa AutoCAD. La macro contiene funciones que automatizan una serie de procesos en el programa para llegar a un determinado resultado. En el caso se describe, la macro utiliza una serie de instrucciones para interpretar unos planos del edificio en dos dimensiones y generar a partir de los mismos una estructura tridimensional en la que cada elemento posee las dimensiones del elemento del edificio real.

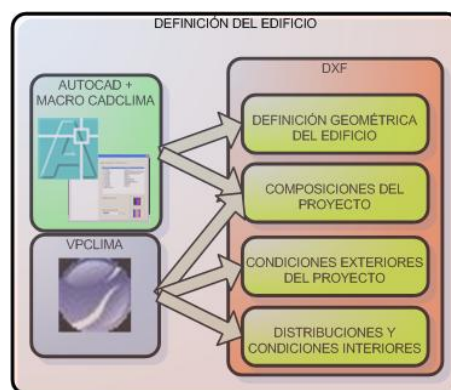


Figura 129: Esquema de introducción de datos para crear el archivo DXF.

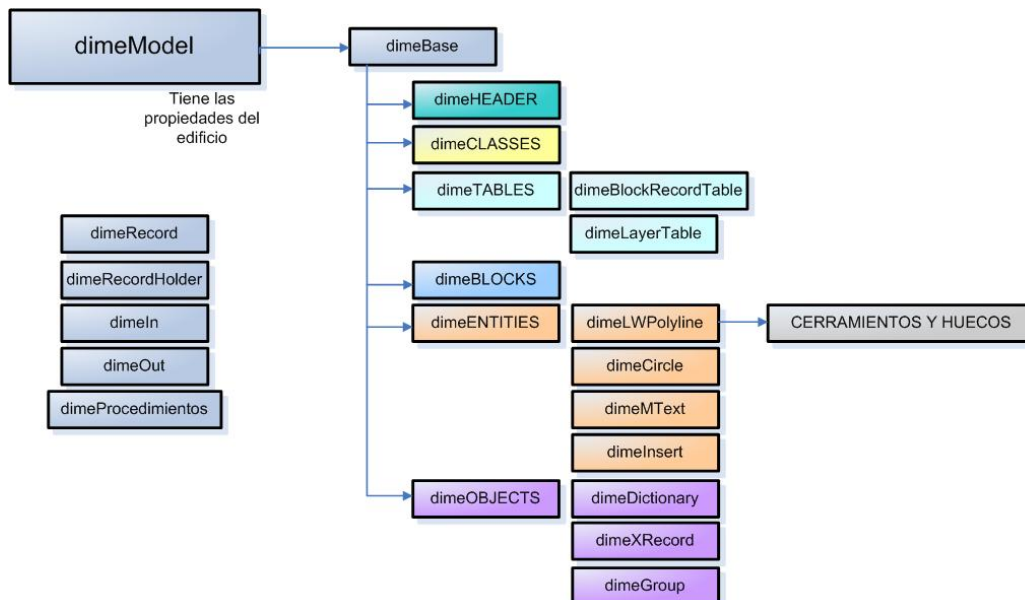
El proceso de descripción del edificio termina con la generación del archivo DXF del mismo. En él está contenida toda la información necesaria para el análisis térmico. Cuando el archivo se carga en la aplicación VPCLIMA, ésta lo interpreta según la

estructura de clases de la librería dime, de manera que la información queda interpretada por el programa para poder ser mostrada, modificada y analizada.

El programa crea un modelo del archivo que contiene estructurada toda la información según la jerarquía de clases. De esta manera resulta más cómodo manipular la información del archivo ya que pasa de ser un archivo de texto a convertirse en una serie de objetos en C++.

El elemento más importante de la jerarquía dime es el modelo del archivo, un objeto llamado modelo, desde él se puede acceder a todos los elementos del mismo utilizando distintas funciones. Podemos acceder a cualquiera de las secciones del documento, saber cuántas capas tiene y buscar las entidades que representan los elementos del edificio entre otras funciones.

Al objeto modelo se le han introducido nuevas funciones para poder acceder directamente a información térmica del edificio, de esta manera podemos conocer cuántas zonas posee el edificio, cuántos locales posee la zona y otras preguntas de interés para el programa térmico.



**Figura 130: Estructura de elementos cargada en la aplicación VPCLIMA después de leer e interpretar un archivo DXF.**

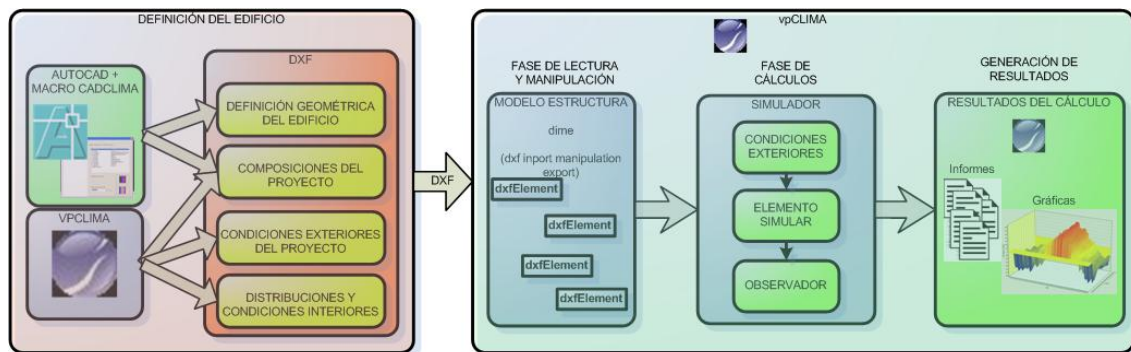
Durante el manejo de la aplicación VPCLIMA el usuario va modificando datos del edificio, de las composiciones empleadas, de las distribuciones horarias de los diferentes sistemas, etc. y con todo ello modifica los valores de los objetos de la estructura. Al volver a generar otro archivo DXF, el programa escribirá toda la información teniendo en cuenta los cambios efectuados en los objetos de la estructura.

Cuando el usuario decide realizar el cálculo de simulación o el cálculo de carga térmica de uno de los elementos que componen el edificio o del edificio en su conjunto, se pasa a la siguiente fase. La siguiente fase consiste en crear una estructura de información paralela para la realización de los cálculos. Se trata de una jerarquía distinta que contiene como clases los distintos agentes que intervienen aportando cargas térmicas al edificio. Esta nueva estructura tiene como objetivo el cálculo térmico, por lo

que tiene implementado en cada una de sus clases el modo de calcular las cargas que aportan al sistema. Por ejemplo la clase muro tiene la manera de calcular la carga térmica que aporta según su orientación, composición, etc. En el siguiente apartado se comenta la estructura del simulador.

Finalmente los resultados de los cálculos se almacenan en un objeto de la estructura del simulador llamado observador, y es a éste a quien hay que acudir para generar la salida de datos del programa. Los datos pueden sacarse en formato gráfica, tabla de resultados, etc. Esta parte está integrada también en el programa VPCLIMA.

La siguiente figura muestra a modo de esquema general el orden establecido para crear el modelo del edificio en el programa y realizar la simulación del mismo.



**Figura 131: Esquema general de la aplicación creada.**

En la parte izquierda del esquema anterior se representa la introducción de datos por parte del usuario con el apoyo de la base de datos para finalmente generar un archivo DXF que contiene los datos necesarios para la simulación.

El usuario actúa con el programa introduciendo datos directamente sobre la aplicación o utilizando un programa CAD para la generación de los datos geométricos. El programa interactúa con la base de datos donde se almacenan distintos valores: las propiedades de los distintos materiales que se utilizan, distribuciones de uso ya creadas, etc. Con todo ello, el resultado es un archivo DXF que contiene toda la información descriptiva tanto de la geometría del edificio como del uso, distribuciones, composiciones y demás datos térmicos necesarios para realizar la simulación. De esta manera el archivo DXF hace la función de enlace entre las aplicaciones, tanto entre la aplicación CAD y el “interface” del programa de cálculo como entre el usuario y el núcleo del programa que es la parte que simula y hace los cálculos. Por tanto, se consigue la interoperabilidad entre las distintas aplicaciones mediante el uso de este formato.

## **7.5. ORGANIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ELEMENTO SIMULADOR**

### **7.5.1. LA CLASE SIMULADOR**

En la parte central del esquema de la figura 131 se representa el elemento simulador, el cual se encarga de crear la estructura de simulación a partir de los datos del archivo DXF y realizar los cálculos de balances de energía necesarios. El elemento simulador es

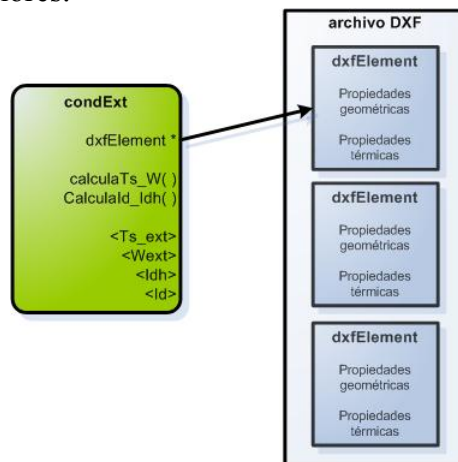


la parte central del programa, donde se organiza la información necesaria y se aplica en los cálculos. Las variables más interesantes de la simulación se recogen en el objeto observador, desarrollado con la finalidad de organizar los resultados que aparecen en el proceso de simulación del edificio. Posteriormente estos resultados se representan en el programa en forma de informe de texto o en forma de gráfica de resultados, como se aprecia en la parte derecha de la figura 131.

En primer lugar se crea un modelo de datos con la lectura del archivo DXF. En este modelo se distinguen cada uno de los elementos que forman la simulación y las características de los mismos, así como las condiciones exteriores existentes. Esta interpretación de los datos la realiza otra estructura distinta que se comenta en el capítulo dedicado a la interoperabilidad. La estructura de simulación que describimos tiene una serie de punteros a objetos de la estructura de lectura para poder leer los datos de cada entidad. Es por tanto la estructura que se describe ahora una estructura de cálculo y gestión de los datos que contiene la otra.

### 7.5.2. LA CLASE CONDEXT

Como se ha comentado en el apartado donde se describen los distintos agentes que intervienen en la simulación energética de edificios, uno de ellos engloba las condiciones exteriores a las que se expone el edificio. Estas condiciones son función del emplazamiento del edificio, latitud, climatología, entorno, etc. Todas ellas vienen reflejadas en el archivo DXF para posteriormente calcular el valor de las variables necesarias en la simulación y ser guardadas en un objeto del programa que tiene por nombre condicionesExteriores.



**Figura 132: clase en la que se almacenan los datos referentes a las condiciones exteriores del proyecto.**

El objeto condiciones exteriores contiene el valor de las variables exteriores necesarias para el cálculo térmico del edificio. Como se observa en la figura existen dos métodos: calculaTs\_W() y calcula Id\_Idh(). El primero de ellos tiene como objetivo el cálculo de los valores de la temperatura seca exterior del edificio y el cálculo de la humedad de la zona, ambos valores se almacenan en los respectivos vectores <Ts\_ext> y <Wext>. La segunda función, calculaId\_Idh() se encarga de rellenar los vectores correspondientes al valor de la radiación directa sobre el plano horizontal y la radiación difusa: <Idh> e <Id>. Los cuatro vectores comentados son bidimensionales de 24x365 valores, es decir, se calculan para cada hora de cada uno de los días del año.



Uno de los primeros pasos del programa es generar toda la información de las condiciones exteriores y almacenarla en los vectores correspondientes para ser utilizada posteriormente por los demás elementos de la simulación. Para tener un acceso rápido al objeto donde se almacena la información del exterior se coloca un puntero en cualquier elemento simulable que señale a este objeto.

### 7.5.3. LA CLASE ELEMSIM

A continuación se detallan primero las clases más genéricas que contienen elementos más básicos y generales para todos los elementos del sistema. Posteriormente descienden de ellas otras que aportan mayor detalle y que representan elementos concretos (paredes, ventanas, locales, etc.).

En el siguiente esquema (Figura 133: Clase del elemento a simular.) se representa una de las partes más importantes del programa de simulación. Se trata de la definición de los distintos elementos simulables que existen en el cálculo. Cada una de estas estructuras o clases se representa por un rectángulo con un texto dentro. En primer lugar, en la parte superior y en negrita se describe el nombre de la clase, posteriormente aparecen varios tipos de definiciones dentro de las mismas:

- Los elementos que contienen el símbolo “ \* ” representan punteros. Un puntero es un indicador de dónde se encuentra el elemento que señala. Los punteros son variables pero en vez de contener un valor específico, contienen las direcciones de las variables a las que apuntan. Un puntero en programación es una dirección de memoria en la que existe el otro elemento que es el señalado.
- Los elementos con el símbolo “ ( ) ” son métodos o funciones. Se trata de una serie de código que maneja el valor de las variables para obtener un resultado.
- Los elementos sin ningún símbolo indican variables de la clase, los valores que definen el estado de la misma.

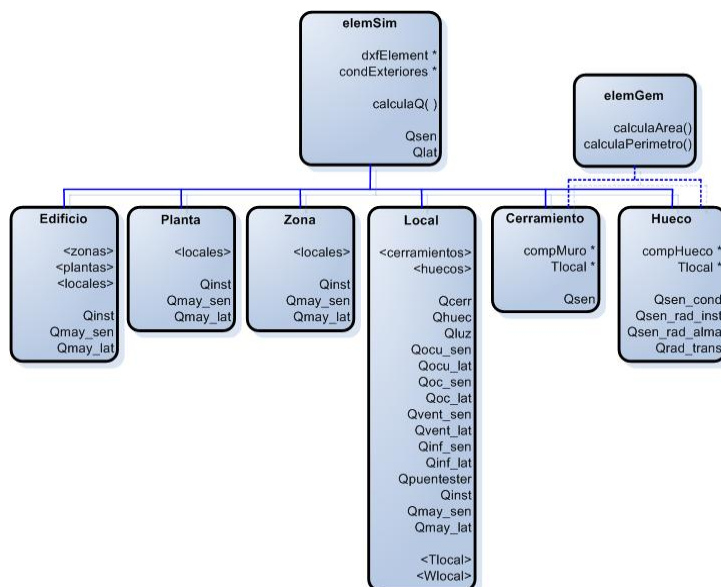
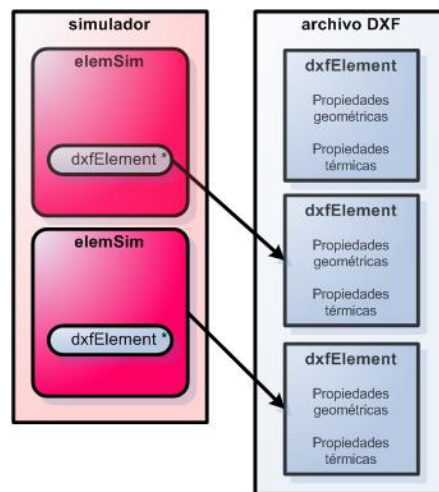


Figura 133: Clase del elemento a simular.

En la parte superior se observa la clase elemSim que representa de forma virtual cualquier elemento que evoluciona en la simulación. Cualquier elemento que se cree a partir de la misma compartirá las mismas propiedades que ésta. Por tanto, todos los elementos inferiores tendrán las mismas propiedades que ella (propiedad de herencia en programación por objetos). La clase elemSim tiene dos punteros, uno de ellos señala a un elemento del documento DXF y el otro a un objeto que representa las condiciones exteriores del proyecto.

Todos los elementos representados en la figura anterior contienen un puntero o una referencia a un elemento que está en el archivo DXF. Como se comenta en el capítulo de interoperabilidad entre aplicaciones, el archivo con formato DXF se ha empleado para el intercambio de información entre la aplicación CAD y el sistema de simulación que se describe. Por tanto, la estructura de simulación necesita obtener datos de los elementos y estos están descritos en el archivo DXF. La siguiente figura representa de forma esquemática este proceso.



**Figura 134: Conexión entre elementos de la estructura de simulación y el archivo DXF.**

Los elementos especificados en el archivo DXF tienen dos partes diferenciadas que son las propiedades geométricas de la entidad gráfica y las propiedades térmicas que representa esa entidad gráfica (muro exterior, cerramiento interior, etc.). Para la simulación necesitamos de ambos tipos de propiedades, por una parte, la entidad gráfica nos revela las dimensiones del elemento que tratamos, y por otra, el tipo de composición nos indica el comportamiento térmico que tiene el elemento.

El puntero dxfElement es por tanto el que mantiene la relación entre los datos del archivo DXF y la estructura de simulación y existe un puntero por cada elemento que se simula en el programa. En realidad este puntero no apunta al archivo en sí. Se ha comentado antes que el archivo inicialmente se carga y se lee en la aplicación, este proceso genera una estructura de datos encargada específicamente de interpretar la información del archivo y el puntero dxfElement apunta a uno de los elementos que contiene esta estructura. La estructura que se crea del archivo DXF se describe en el capítulo de interoperabilidad.

En la misma clase elemSim existe otro puntero de nombre condExt. Este puntero señala la dirección de memoria donde se encuentra definida la estructura que almacena

los datos referidos a las condiciones exteriores del proyecto que ya se ha comentado en el apartado anterior.

Si volvemos a observar la clase elemSim podemos observar el método calcularQ( ), este es un método virtual cuya finalidad es la de calcular el valor de los flujos Qsen y Qlat de cada elemento. Es un método virtual porque cada elemento tiene su definición de la función calcularQ, es decir, cada uno de los objetos que descienden de la clase elemSim tiene un modo distinto de calcular el valor del calor y en cada uno de ellos existe esta misma función en la que se define su manera particular de hacerlo. Los objetos están pensados de modo que todos tienen unas variables llamadas Qsen y Qlat que representan el valor de la potencia térmica sensible y latente para un momento determinado.

Con todo esto concluimos que los elementos de la estructura que pueden simularse tienen en común una variable para almacenar el valor de la carga sensible en un determinado momento –Qsen-, otra variable para la carga latente –Qlat-, un método para calcular el valor de estas -calcularQ( )- y dos punteros a otros objetos, uno al que contiene las propiedades del mismo -dxfElement \*- y otro al que contiene las propiedades de las variables exteriores -condExt \*- . Además de esta parte común para todos los elementos existe una parte particular para cada uno de ellos en función del tipo de elemento que se represente.

A continuación se hace una rápida descripción de cada una de las clases que descienden del elemento elemSim con la finalidad de comentar sus particularidades más interesantes.

#### 7.5.4. LA CLASE EDIFICIO

En la Figura 133: Clase del elemento a simular. podemos observar que existe una clase llamada Edificio la cual desciende de la clase elemSim. Además de las propiedades que por herencia recibe de ésta última también posee propiedades características que la diferencian de las demás. En el caso de la clase Edificio aparecen tres vectores distintos, en uno se guardan punteros a las distintas zonas que posee el edificio, otro contiene punteros a las plantas del edificio y el último almacena el lugar donde se definen los locales del edificio.

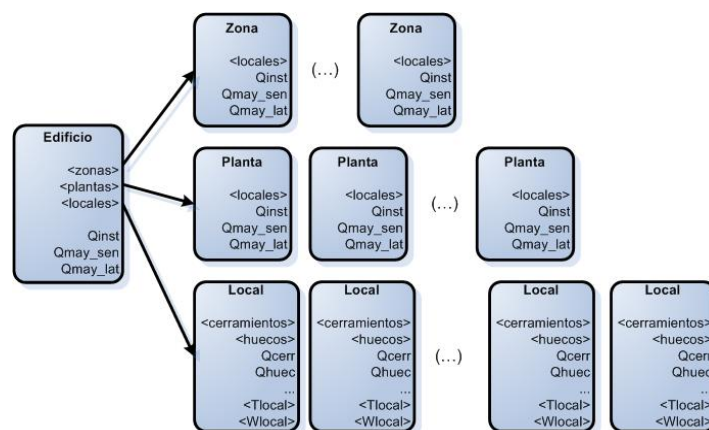


Figura 135: Clase edificio y elementos que la conforman.

A pesar de que cada uno de los elementos que se simulan son independientes los unos de los otros, la clase Edificio lleva una referencia a los elementos que lo conforman como son las plantas, las zonas y los locales. Con ello se crea una conexión con los elementos que forman el edificio y el objeto que lo describe.

El programa hace el balance de energía necesario para el cálculo de la demanda en los objetos llamados locales. Por tanto estos objetos son la unidad básica en el edificio. Los locales pueden organizarse en zonas, las cuales representan grupos de locales con un sistema de climatización común. Además, también existe la organización geométrica o estructural del edificio en plantas, que son grupos de locales a la misma cota. El objeto edificio contienen una conexión con cada una de las distintas organizaciones del edificio y además con cada local.

En el caso de la simulación de un edificio el usuario puede pedir conocer el valor de distintas variables, el calor sensible total de edificio, el latente, o incluso el calor de uno de los locales en concreto o la evolución de la temperatura del mismo durante un periodo de tiempo determinado. Para conocer todas estas variables la estructura necesita una conexión entre los distintos elementos y esa conexión se consigue almacenando la dirección de memoria de esos objetos (locales, zonas o plantas) en vectores que están en el edificio. De la misma manera, cuando se ejecute la función de calcular la energía del edificio, éste llamará a cada uno de las zonas que lo componen y éstas a cada uno de los locales de las mismas para calcular el valor de la energía en cada una de ellos y componer así el valor de la energía total como suma de cada una de las anteriores.

Además de las variables  $Q_{sen}$  y  $Q_{lat}$  –para almacenar el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente- que tienen todos los elementos simulables, el objeto edificio tiene también tres variables más, se trata de  $Q_{inst}$ ,  $Q_{may\_sen}$  y  $Q_{may\_lat}$ . La primera de las tres,  $Q_{inst}$ , almacena el valor del flujo de calor debido a la propia instalación como componente que emite calor. Este valor se estima como un porcentaje del valor total calculado del flujo de calor en un instante determinado. Si no se desea considerar basta con colocar un valor del 0% para hacerlo nulo. Las variables  $Q_{may\_sen}$  y  $Q_{may\_lat}$  tienen su aplicación en el proceso de cálculo de cargas térmicas, donde almacenan el incremento del valor total por flujo sensible y latente respectivamente debido a un coeficiente de mayoración.

El programa permite simular cualquiera de los elementos que descienden de la clase `elemSim` de forma independiente. En el caso de simular un objeto edificio, el primer paso es la construcción del mismo. Para ello se crea un objeto del tipo edificio cuyas propiedades vienen definidas en el archivo DXF. Posteriormente se crean cada una de las zonas y de las plantas que hay descritas en el mismo como objetos independientes, con lo que se crea un objeto por cada zona y uno por cada planta. La dirección de memoria de cada uno de estos objetos es almacenada en el vector de plantas y zonas que posee el edificio, con la finalidad de tener una conexión con las mismas y reconocer que pertenecen al mismo. El siguiente paso es la generación de cada local como objeto independiente, el cual, de la misma manera que las plantas y zonas se añade al vector de locales, en este caso, del edificio.

### 7.5.5. LA CLASE LOCAL

Siguiendo con el procedimiento, la creación de cada uno de los locales lleva implícita la creación también de cada uno de los elementos que lo integran. De esta manera se crean las paredes que van asociadas al mismo, las ventanas, las puertas y demás. Todos estos elementos se conectan con el local al que pertenecen porque éste contiene a su vez un vector de punteros a cerramientos y otro de punteros a huecos. Tal como se representa en la siguiente figura.

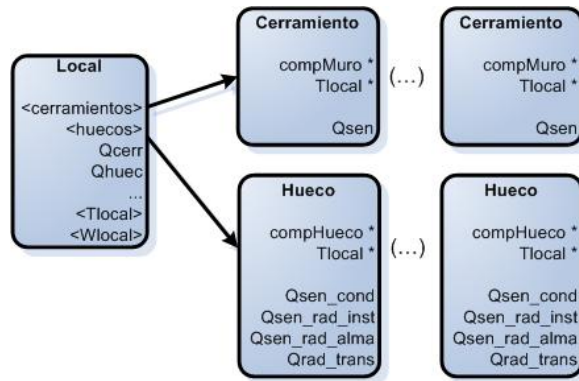


Figura 136: Clase local y la conexión con cerramientos y huecos.

El programa realiza los balances de energía en el Local, por tanto, en esta clase es donde se recopila la información necesaria y se aborda el cálculo, dentro de su función de calcularQ (descendiente de la clase elemSim). Para el cálculo de la demanda es necesario almacenar una historia de valores de la temperatura dentro del local, para lo cual hay un vector llamado Tlocal el cual almacena los 48 valores necesarios para el cálculo de la demanda.

El local almacena una gran cantidad de variables distintas:

- El flujo de calor total sensible del local: Qlocalsen
- El flujo de calor total latente del local: Qlocallat
- El flujo de calor aportado por los cerramientos: Qcerr
- El flujo de calor aportado por los huecos: Qhuec
- El flujo de calor aportado por las luminarias: Qluz
- El flujo de calor sensible debido a los ocupantes del recinto: Qocusen
- El flujo de calor latente debido a los ocupantes del recinto: Qoculat
- El flujo de calor sensible debido a los equipos: Qocsen
- El flujo de calor latente debido a los equipos: Qoclat
- El flujo de calor sensible aportado por la ventilación: Qventsen

- El flujo de calor latente aportado por la ventilación:  $Q_{ventlat}$
- El flujo de calor sensible debido a las infiltraciones:  $Q_{infsen}$
- El flujo de calor latente debido a las infiltraciones:  $Q_{inflat}$
- El flujo de calor latente debido a los puentes térmicos del local:  $Q_{puentesT}$
- El flujo de calor latente debido a la propia instalación:  $Q_{propiaInst}$

El proceso de cálculo se ejecuta llamando a la función `calcularQ` del objeto. En ese momento, el local emprende una serie de instrucciones para obtener el valor de todas las variables mencionadas anteriormente.

Algunas de estas variables se calculan en objetos independientes, es el caso del calor debido a los cerramientos y el calor debido a los huecos los cuales se calculan en cada uno de estos elementos. El valor de las demás variables se obtiene en la clase local. Para calcular las variables relacionadas en la iluminación, la carga de los ocupantes y las cargas de los demás equipos se utilizan diversos datos a los que el local debe tener acceso como son: la potencia asignada a cada uno de los factores y la distribución o porcentaje de uso de los mismos a lo largo del día.

Las distribuciones de uso que utiliza el programa se almacenan en el archivo `DXF` y se cargan en la aplicación en el momento de la lectura del archivo. Posteriormente el local tiene acceso a las mismas a través de un puntero que guarda.

#### **7.5.6. LA CLASE OBSERVADOR**

La finalidad de la clase observador es seguir el valor de las variables que se desean controlar en la simulación y almacenar los valores de éstas en vectores. Con todos estos datos se pueden ofrecer gráficas e informes de resultados de la simulación.

En el objeto simulador se distinguen dos vectores, uno almacena direcciones de vectores que guardan los valores de una determinada variable hora a hora para todo el año. El otro vector guarda los valores de las variables que sólo se quieren conocer su máximo, la hora y el día en que se produce.

El uso de la programación orientada a objetos aplicada en programas de simulación térmica del edificio se describe en la tesis doctoral del Dr. Coronel (Ref. 30), en la cual se describe una jerarquía de clases utilizada en el ESTO2 (Entorno de Simulación Térmica Orientado a Objetos) Todo este esquema de clases y objetos que se ha creado pretende conseguir tres características que se han considerado más importantes para la aplicación: modularidad, flexibilidad e interoperabilidad. La modularidad aporta orden a la estructura de datos y facilita la posible ampliación de la misma. La flexibilidad permite realizar modificaciones en los componentes, por ejemplo la manera de hacer los cálculos en el local, etc. La interoperabilidad permite utilizar otras aplicaciones como AutoCAD para definir la geometría del edificio de una manera más rápida y fácil.

## **7.6. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO**

Ref. 30

“Simulación Térmica de Entornos Arquitectónicos Aproximación a los Espacios Exteriores”. Tesis doctoral: Coronel Toro, Juan Francisco (1998).

Ref. 31

“Programación Orientada a Objetos con C++”. Ediciones Anaya. Pereda, M., Mateo, J. (1994)

Ref. 32

“Sistematización de Acoplamientos Térmicos y Termoeráulicos en la Simulación de Edificios”. Tesis doctoral: Rodríguez García, Eduardo (1990).

Ref. 33

“Energy Simulation In Building Design”. J. Clarke

## 8. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS

### 8.1. MÉTODOS MÁS IMPORTANTES

En el siguiente capítulo se describe la metodología empleada en el programa vpCLIMA para el cálculos de cargas térmicas en el edificio. El capítulo no describe ninguna novedad en este campo, se limita a describir la formulación matemática empleada en el programa para realizar los cálculos térmicos. Respecto a esta materia, resulta importante resaltar los primeros estudios que se realizaron en nuestro país relacionados con este tema, J.M. Pinazo(Ref. 39), J.L. Molina(Ref. 46) y S. Álvarez (Ref. 45), entre otros, son referentes básicos en esta área.

Actualmente existen dos metodologías para el cálculo de cargas térmicas que se pueden considerar más importantes: Método del Balance y las Series Temporales Radiantes.

#### 8.1.1. MÉTODO DEL BALANCE

Consiste básicamente en realizar balances de energía en cada una de las superficies que conforman el edificio (por cada pared o hueco dos temperaturas superficiales) y un balance de energía y humedad en el aire de cada recinto.

En cada superficie de los cerramientos se establece un balance de energía en el que se estima de distintas formas, en función de su naturaleza, el valor del flujo de calor transmitido entre las caras de un cerramiento. El flujo de calor transmitido por conducción tiene carácter transitorio y puede estimarse mediante el método de las funciones de transferencia o mediante factores de respuesta. El balance también tiene en cuenta el flujo de calor intercambiado con el aire por convección. El intercambio de calor por radiación se compone de dos contribuciones en función de la longitud de onda. La radiación solar actúa como radiación de onda corta, mientras los demás elementos que intercambian calor mediante radiación: otras superficies, ocupantes, etc., lo hacen como radiación infrarroja.

Las expresiones concretas para estimar los distintos flujos de calor varían según el tipo de superficie, para superficies exteriores o interiores. A continuación se representa la ecuación del balance sobre una superficie, considerando los elementos anteriormente mencionados:

$$Q_{radiación,\lambda corta} + Q_{radiación,\lambda larga} + Q_{convección} + Q_{conducción} = 0$$

**Ecuación 13**

El balance de energía en el aire está compuesto por la convección de todos los cerramientos que forman el espacio, la energía transferida por convección de todas las cargas internas del mismo y el aporte de la ventilación i las infiltraciones existentes. La ventilación se debe tratar dependiendo de si atraviesa previamente un equipo que la atempera o no. El balance en el aire del espacio se representa mediante la siguiente expresión:



$$\rho_a \cdot V \cdot C_a \cdot \frac{\partial T_{\text{int}}(t)}{\partial t} = Q_{\text{conv\_cerramientos}} + Q_{\text{conv\_cargasInternas}} + Q_{\text{sen\_ventilacion}} + Q_{\text{sen\_infiltración}} + Q_{\text{sen\_equipos}}$$

**Ecuación 14**

Para realizar el balance de vapor, calor latente, en el aire del recinto, se deben contabilizar los aportes de los ocupantes, de los procesos, de la ventilación, teniendo en cuenta las características del aire introducido y del modo en que se realiza la ventilación, y de las infiltraciones. Así, la expresión que describe estos cálculos es la siguiente:

$$\rho_a \cdot V \cdot C_f \cdot \frac{\partial W_{\text{int}}(t)}{\partial t} = Q_{\text{lat\_cargasInternas}} + Q_{\text{lat\_ventilacion}} + Q_{\text{lat\_infiltración}} + Q_{\text{lat\_equipos}}$$

**Ecuación 15**

Características del Método del Balance:

- Es un procedimiento muy riguroso.
- Es necesario el uso de un software adecuado para su cálculo.
- Requiere gran tiempo de computación y capacidad del ordenador.
- No separa la aportación de cada carga, sólo observamos la repercusión final de todas ellas.
- Es el método utilizado para la simulación energética de edificios de los programas DOE2 y TRNSYS entre otros.
- En general no es este el procedimiento utilizado para el cálculo de cargas térmicas.

### 8.1.2. MÉTODO DE LAS SERIES TEMPORALES RADIANTES

El método consiste en calcular de forma independiente y para cada instante el valor de cada uno de los elementos que realizan una aportación energética al recinto. La cantidad de energía finalmente aportada al aire se estima como suma de cada una de las aportaciones individuales (Ref. 34).

Se debe distinguir para cada carga entre ganancia, cantidad de energía que se introduce en el recinto, y carga, cantidad de energía que es comunicada al aire. Para ello, en cada aportación (ganancia) se discrimina entre la cantidad de energía que se introduce en el interior del recinto en forma de:

- Convección, ganancia que pasa a carga de forma instantánea.
- Radiación, ganancia que en parte se comunica al aire en ese mismo instante y por lo tanto es carga instantánea, y en parte es absorbida por los cerramientos, muebles,... y de forma retardada se comunicará al aire.

En la tabla adjunta se detalla el porcentaje asumido para cada aportación de intercambio convectivo y radiante.

Tipo de carga	%Radiación	%Convección
Ocupantes	60	40
Equipos con ventilador	10	90
Equipos sin ventilador	30	70
Conducción paredes y suelos	46	54
Conducción techos	60	40
Conducción ventanas factor solar >0,5	33	67
Conducción ventanas factor solar ≤0,5	46	54
Radiación solar sin elementos sombra interiores	100	0
Radiación solar con elementos sombra interiores, factor solar >0,5	33	67
Radiación solar con elementos sombra interiores, factor solar ≤0,5	46	54
Infiltración	0	100

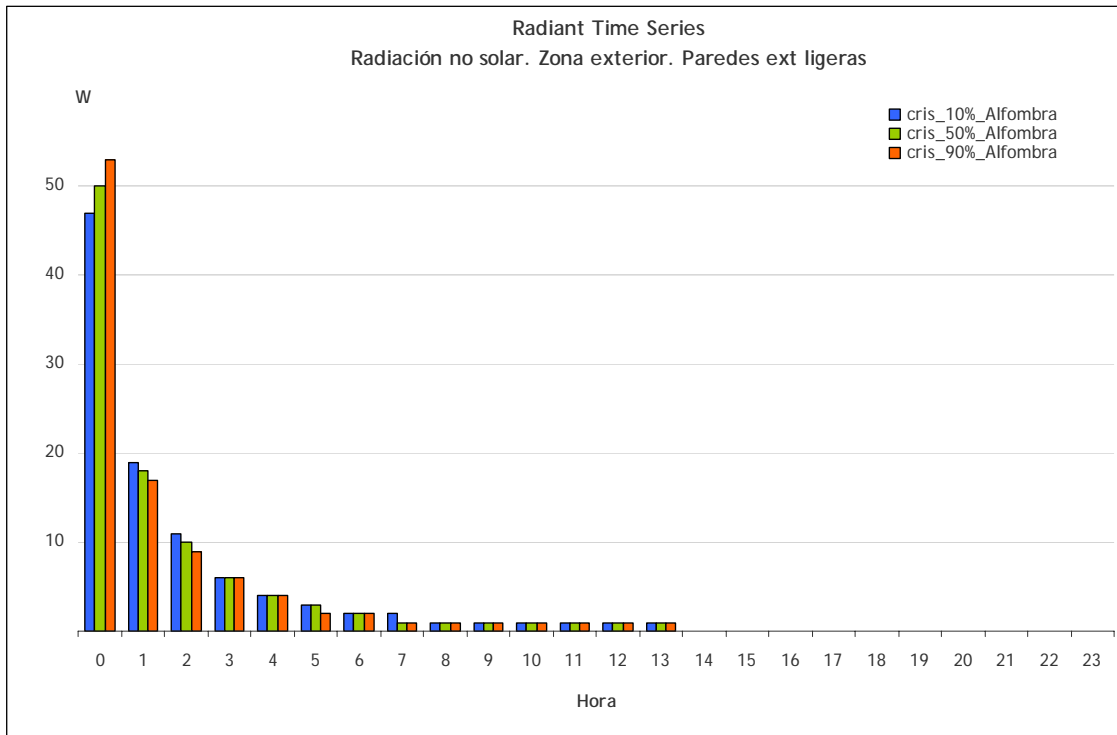
**Tabla 5: Porcentaje radiante y convectivo de cada aportación**

En la tabla se observa que cada tipo de ganancia se transforma en carga de manera distinta. El retraso temporal entre el instante del aporte y el de la transformación en carga de cada tipo de ganancia depende de las características térmicas del recinto y del tipo de superficie sobre el que incida: cerramientos, muebles, alfombras, suelo, etc.

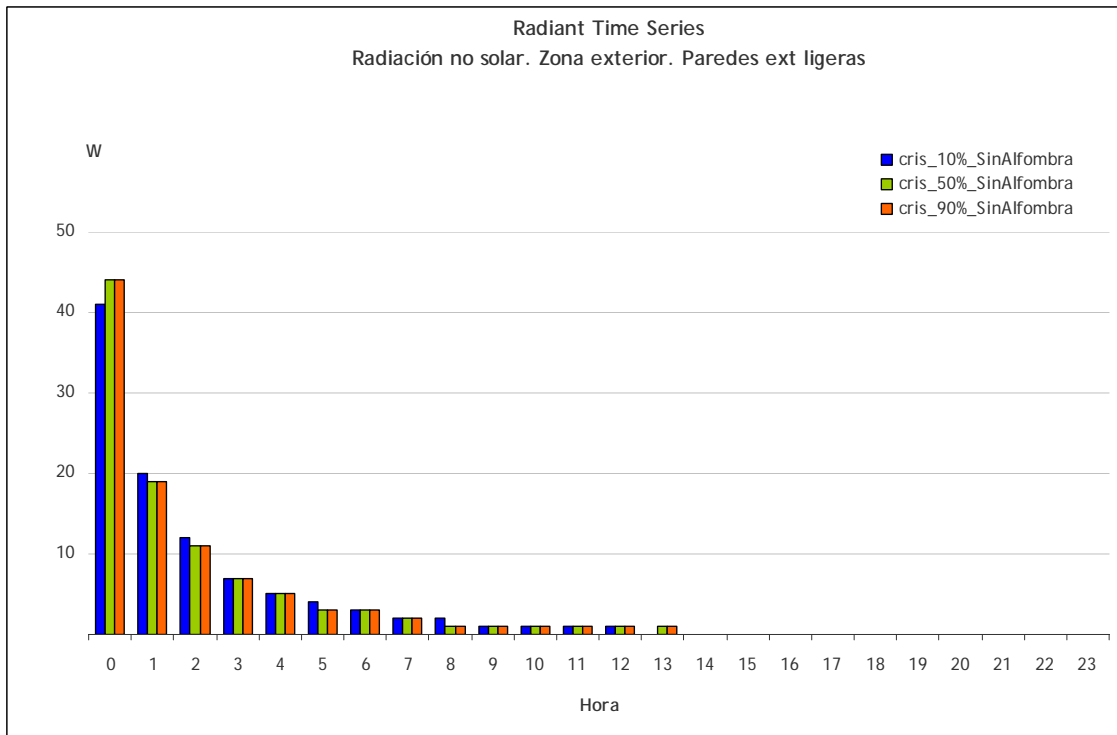
En las siguientes figuras se describe cómo la ganancia radiante se transforma en carga térmica en el aire del recinto dependiendo de las siguientes variables térmicas del espacio:

- Tipo de cerramientos:
  - Zona construida con cerramientos ligeros, paredes industrializadas tipo sándwich.
  - Zona construida con cerramientos medios, paredes con ladrillos normales.
  - Zona construida con cerramientos pesados, paredes que contienen una capa de hormigón importante.
- Distribución de la radiación:
  - Radiación solar, incide básicamente en el suelo y una pequeña proporción se refleja a los demás cerramientos del recinto.
  - Radiación no solar, incide sobre todos los cerramientos, básicamente en función de su área.
- Incidencia de la radiación:
  - Suelo con Alfombras o moquetas.
  - Suelo sin alfombras ni moquetas: pavimento.
- Tipo de zona térmica:
  - Zona exterior, con algún cerramiento al exterior.
  - Zona interior, todos los cerramientos interiores.

Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación de onda larga en una zona con muros ligeros, composición sándwich, con y sin alfombras:

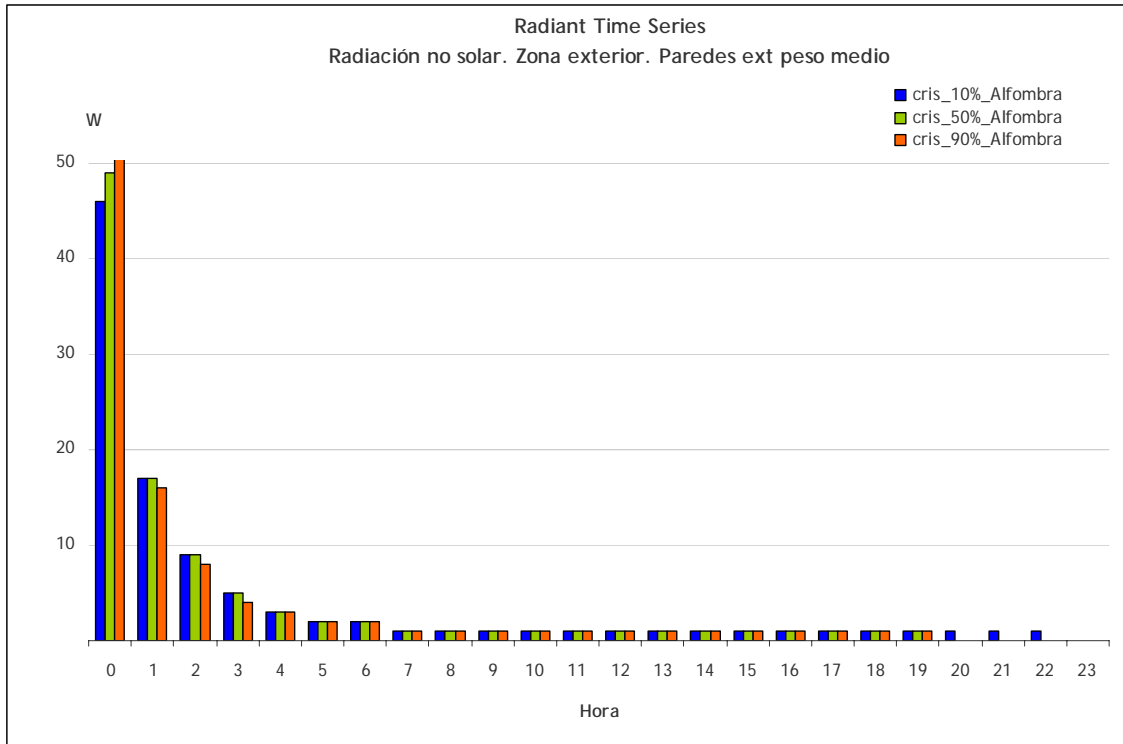


**Gráfica 1: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores ligeras con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.**

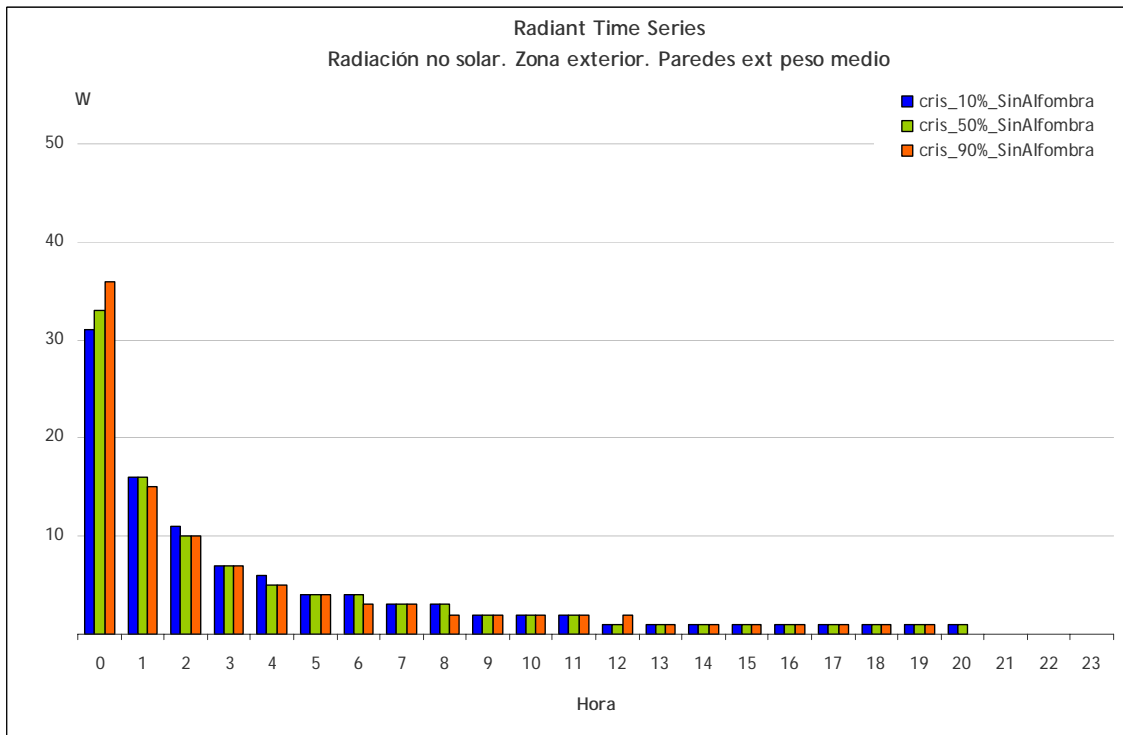


**Gráfica 2: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores ligeras sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.**

Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación de onda larga en una zona con muros de peso medio, ladrillos normales, con y sin alfombras:

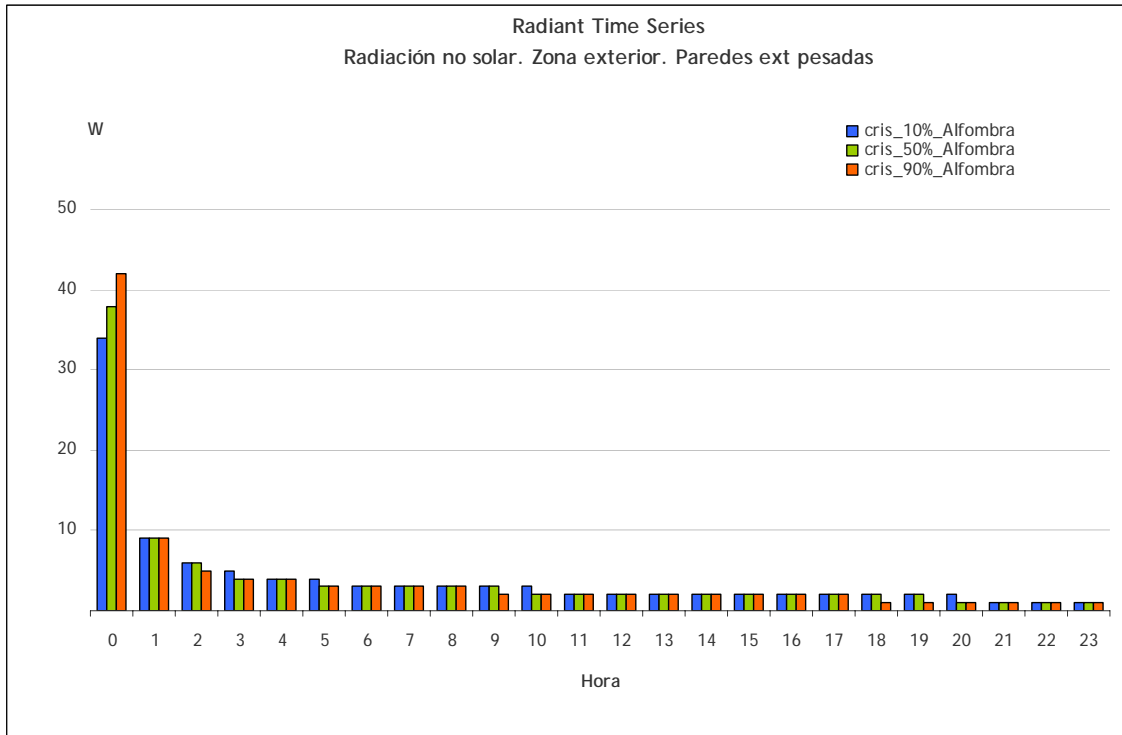


**Gráfica 3: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores de peso medio con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.**

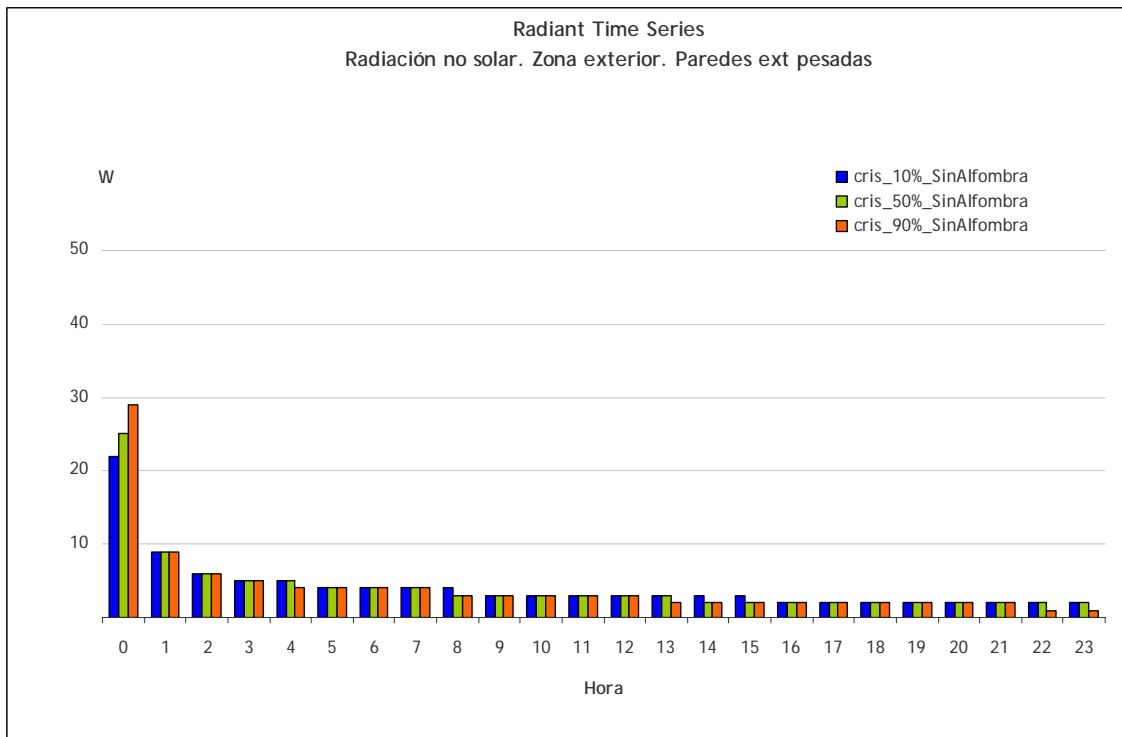


**Gráfica 4: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores de peso medio sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.**

Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación de onda larga en una zona con muros pesados, capa importante de hormigón, con y sin alfombras:

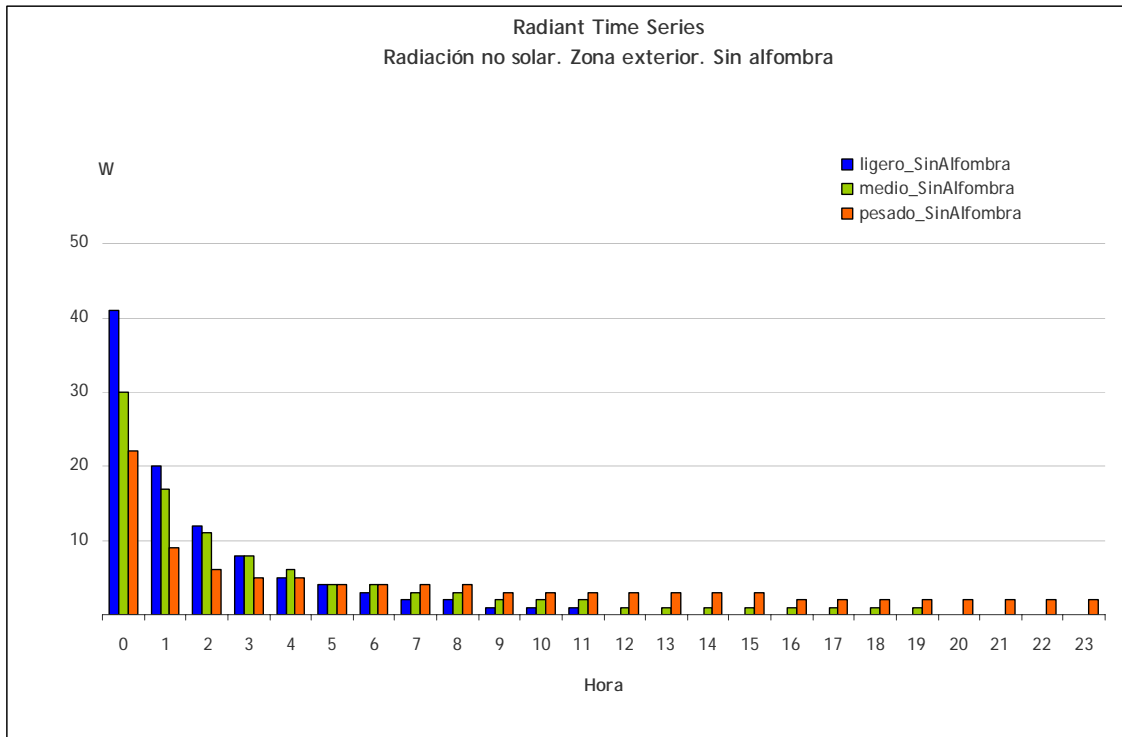


Gráfica 5: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores pesadas con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.

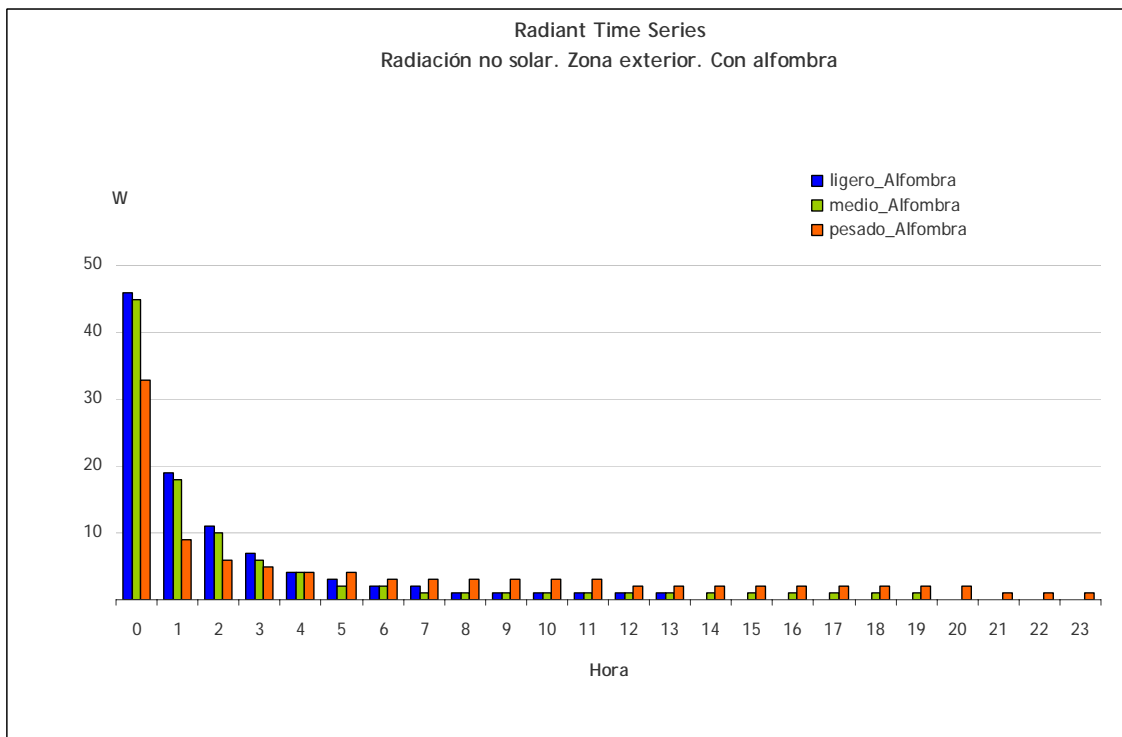


Gráfica 6: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con paredes exteriores pesadas sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.

Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación de onda larga en una zona con todos los muros interiores, con y sin alfombras:

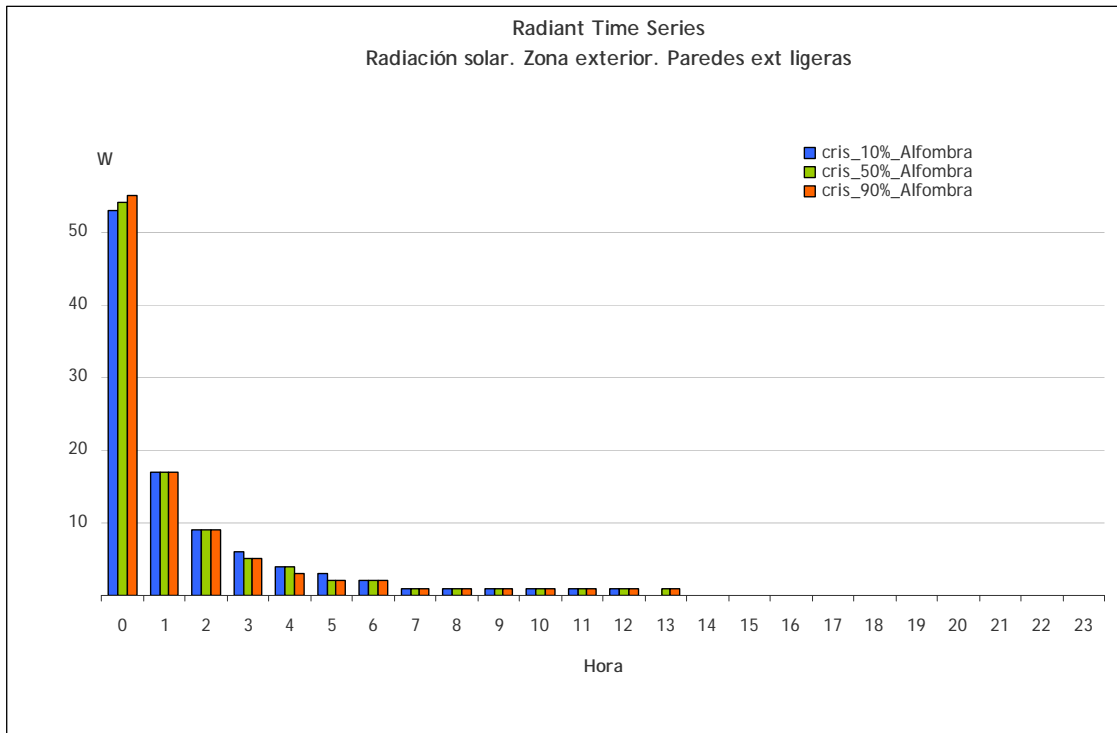


**Gráfica 7: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con todas las paredes interiores sin revestimiento de alfombra en el suelo.**

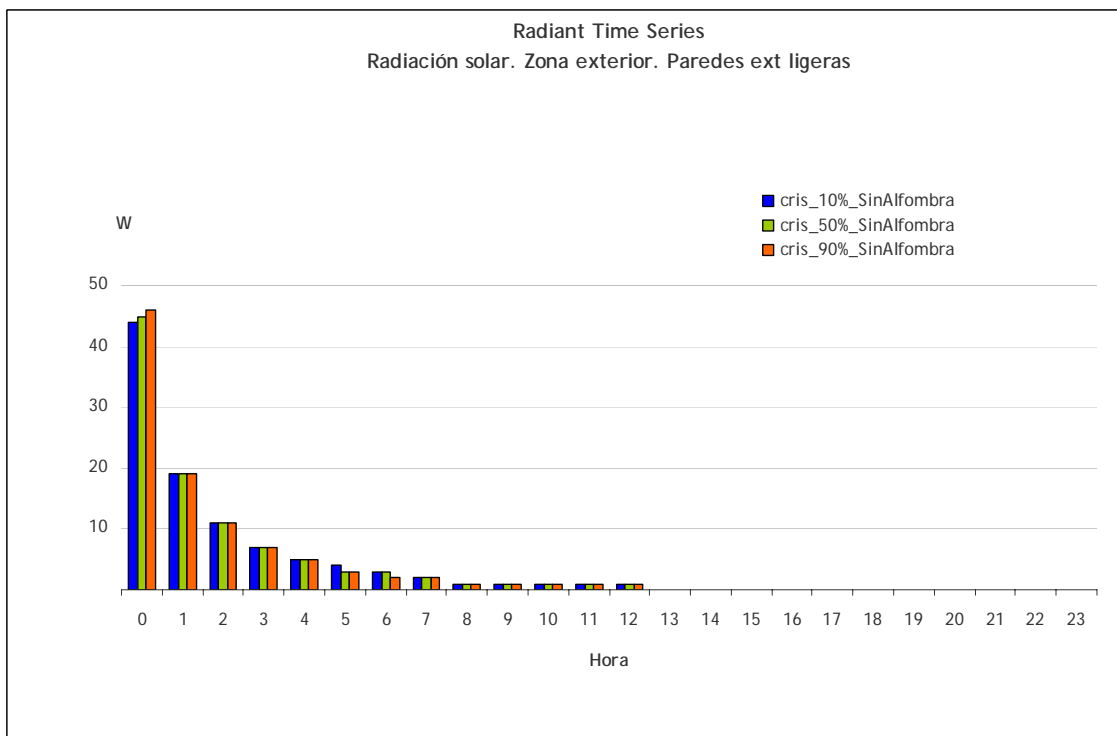


**Gráfica 8: Radiant Time Series para la radiación de onda larga en una zona con todas las paredes interiores con revestimiento de alfombra en el suelo.**

Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación solar sobre una zona con muros exteriores ligeros, con y sin alfombras:

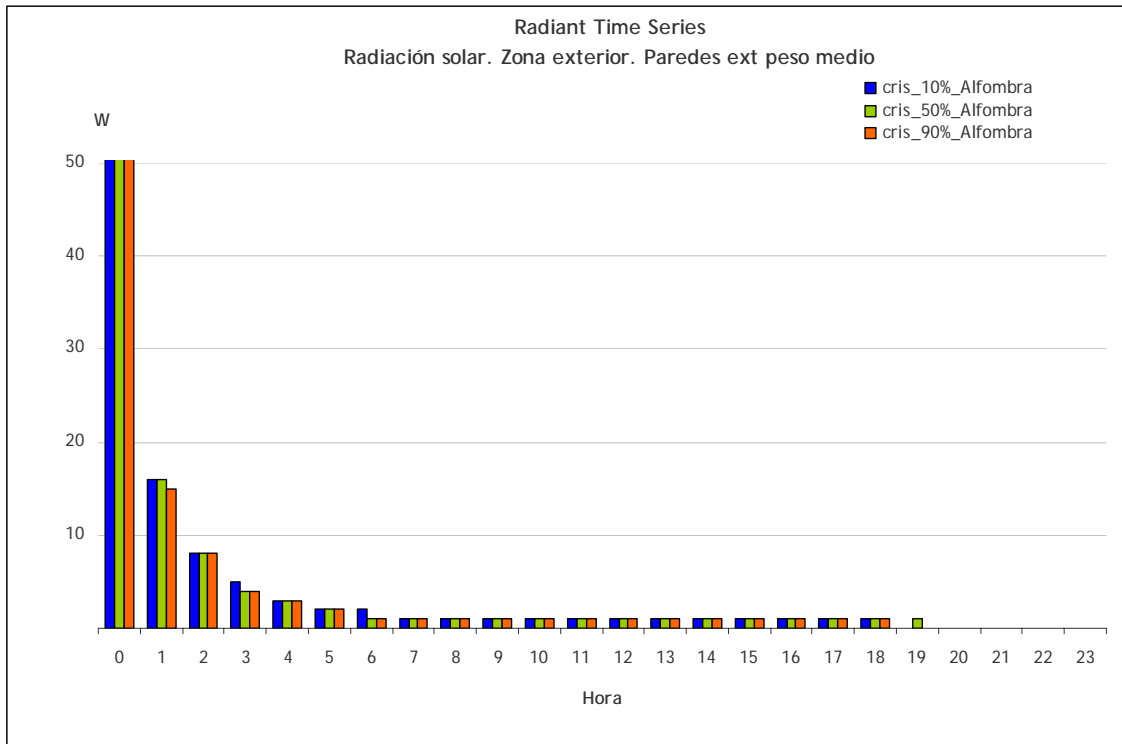


Gráfica 9: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores ligeras con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.

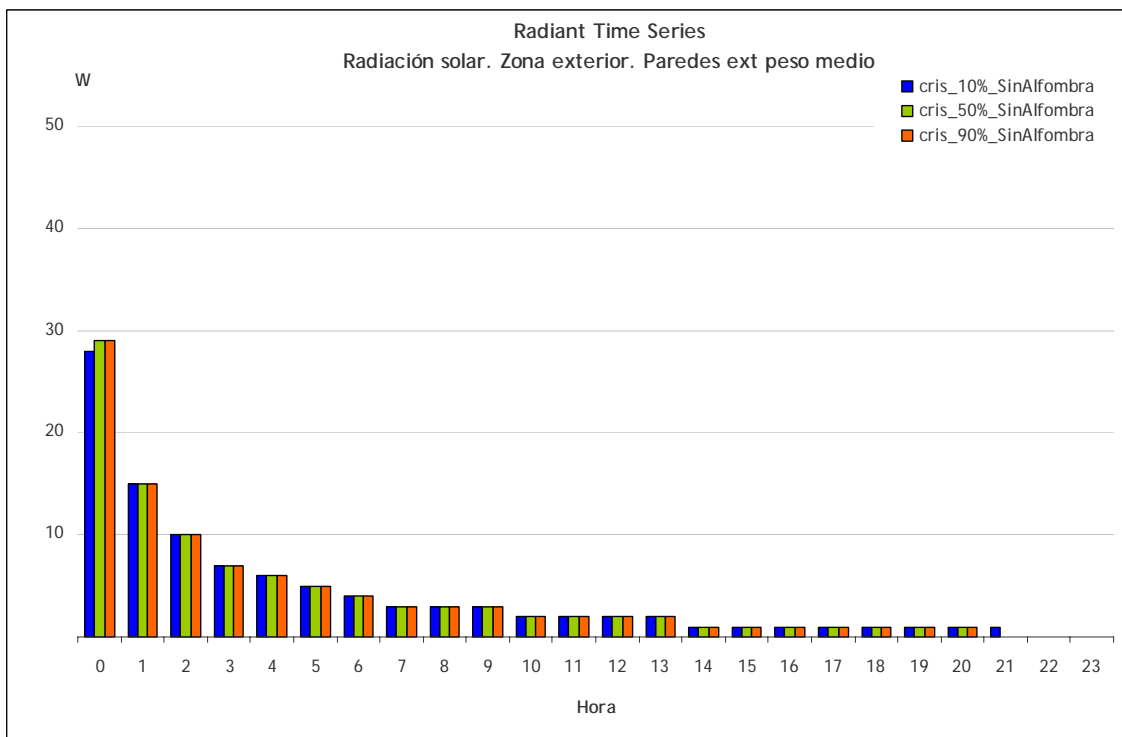


Gráfica 10: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores ligeras sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.

Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación solar sobre una zona con muros exteriores de peso medio, con y sin alfombras:



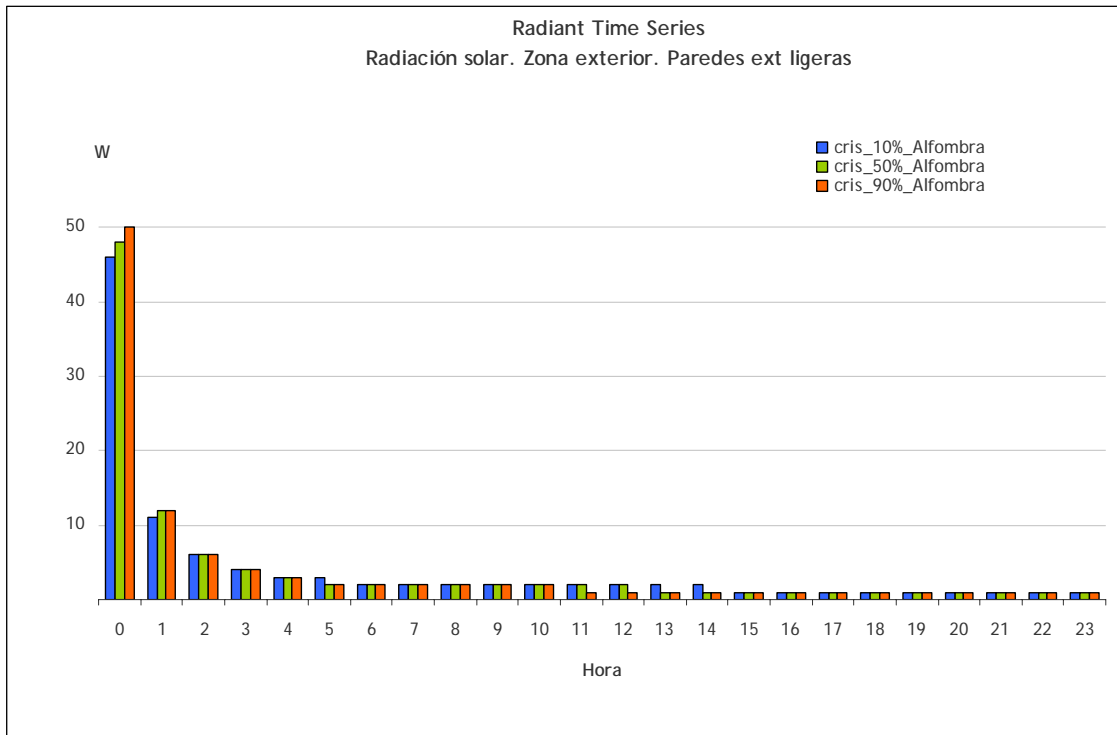
Gráfica 11: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores de peso medio con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.



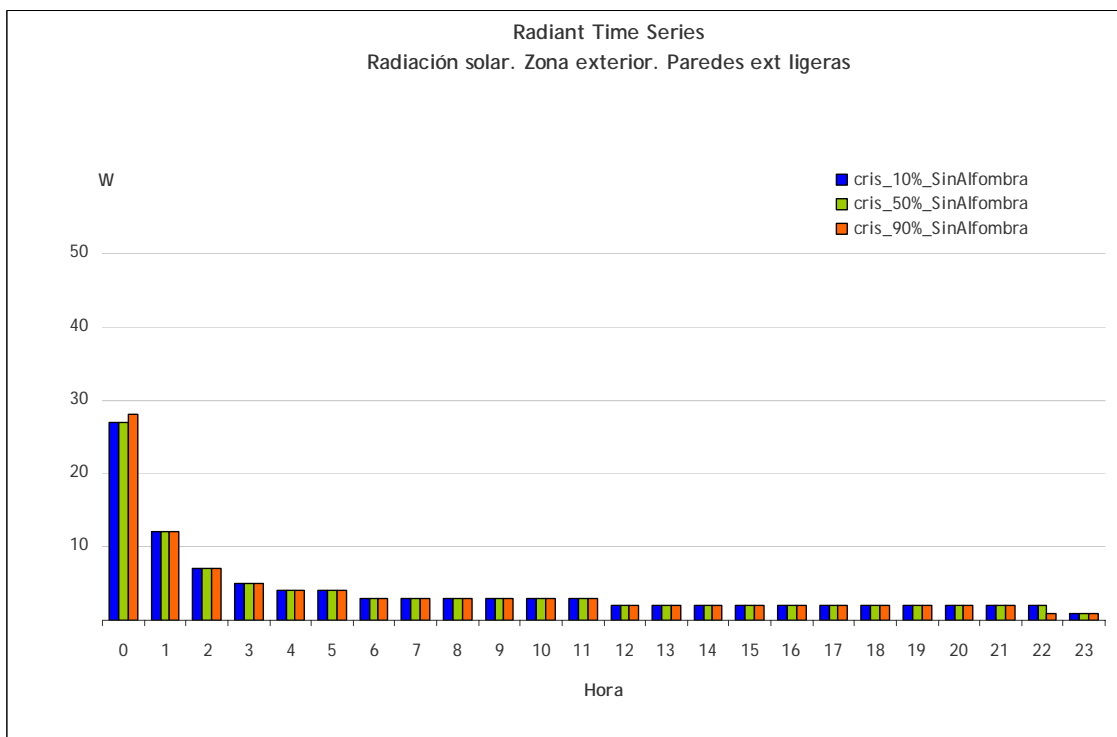
Gráfica 12: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores de peso medio sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.



Representación del valor de las Series Temporales Radiantes para la radiación solar sobre una zona con muros exteriores pesados, con y sin alfombras:



**Gráfica 13: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores pesadas con revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.**



**Gráfica 14: Radiant Time Series para la radiación solar en una zona con paredes exteriores pesadas sin revestimiento de alfombra en el suelo del espacio.**

En la siguiente expresión se muestra la relación existente entre una ganancia genérica y la carga térmica que esta transfiere en cada instante al aire del recinto:

$$Q_{carga}(n) = C G(n) + \sum_{j=0}^{23} (1 - C) G(n - j) TRS(j)$$

**Ecuación 16**

Donde:

- $Q(n)$  es la carga (W) en el instante “n”
- $G(n)$  es la ganancia (W) en el instante “n”
- $C$  es el porcentaje de energía (en tanto por uno) que es convectiva respecto a la total intercambiada por dicha contribución. (Se supone que la que no es convectiva es radiante).

El cálculo de la ganancia (energía transmitida al interior del recinto) se estima por procedimientos distintos en función de la contribución considerada, así:

- Transmisión de calor a través de cerramientos opacos. Se realiza mediante funciones de transferencia o factores de respuesta, entre las temperaturas del aire que están a ambas partes del cerramiento, considerando en sus superficies un coeficiente global de convección-radiación (de onda larga).
- Transmisión de calor a través de cerramientos semitransparentes. Se distingue entre aportes por conducción-convección (a través del coeficiente global de transferencia de calor del hueco, y por lo tanto incluye el intercambio de longitud de onda larga) y radiación solar (el cual debe tener en cuenta el factor solar del hueco, la fracción soleada y la transmisión de energía en función del ángulo de incidencia de la radiación solar).
- Transmisión de calor por ventilación e infiltración. No se considera inercia y depende del caudal manejado y de las condiciones del aire.
- Transmisión de calor por ocupantes, luces y máquinas. Función de la cantidad de energía disipada por cada una de dichas contribuciones (que es función de la actividad, tipos de iluminaria, etc...).

Las características más destacables de este procedimiento son:

- Es un procedimiento menos riguroso (se entiende que en general aumenta algo las cargas (entre un 5 y 10%) respecto al método anterior. Este porcentaje es mayor conforme mayor sea la superficie acristalada.
- En general es necesario el uso de un software adecuado para su cálculo, no obstante se pueden obtener tablas finales con las que poder evaluar las cargas en situaciones simples.

- No requiere gran tiempo de computación ni capacidad del ordenador.
- Separa la aportación de cada contribución, por lo que presenta indicaciones al proyectista de cómo mejorar su diseño.
- En general es este el procedimiento utilizado para el cálculo de cargas térmicas [ 1 ].

## 8.2. TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS EXTERIORES

### 8.2.1. FACTORES DE RESPUESTA

La ecuación que describe la transferencia de calor a través de un material homogéneo tiene en cuenta los siguientes factores:

- la transferencia de calor a través de las superficies del contorno de un pequeño volumen de control elemental correspondiente al gradiente de temperatura existente entre ambas superficies,
- la generación de calor debida a fuentes internas en el volumen de control, y
- el cambio de energía interna del material del que se constituye el volumen de control, el cual se expresa en un cambio de temperatura en el mismo.

Con todo ello, la ecuación que resulta tiene la forma:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T - \dot{q} = 0$$

**Ecuación 17**

Donde,

$\rho$  representa la densidad en  $\frac{kg}{m^3}$

$C$  representa el calor específico en  $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

$k$  representa la conductividad térmica del material en  $\frac{kW}{kg \cdot K}$

$T$  es la temperatura expresada en  $K$

$\dot{q}$  son las ganancias de calor debidas a la fuente interna,  $\frac{kW}{m^3}$

$t$  es el tiempo en segundos.

Por otro lado, debe considerarse la expresión que representa el flujo de calor a través de una superficie como:

$$q(x,t) = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$$

**Ecuación 18**

Donde,

$k$  representa la conductividad térmica del material en  $\frac{kW}{kg \cdot K}$

Con las expresiones anteriores se puede entender que el cálculo del flujo de calor en régimen transitorio no es una cuestión simple. Existen varios procedimientos para determinar la transmisión de calor en régimen transitorio a través de un cerramiento cuando se conoce la evolución de la temperatura del aire en ambas partes del cerramiento y se puede resumir el intercambio de calor en las superficies mediante un coeficiente global de convección-radiación con la temperatura del aire.

El método empleado en el programa vpCLIMA es el de los factores de respuesta, que consiste en utilizar los valores de la cantidad de calor que atraviesa el muro, en las superficies, cuando a una parte de la pared realizamos una evolución de la temperatura de forma triangular, de altura unidad y amplitud  $2h$ , tal y como se muestra en la figura.

El método de los factores de respuesta fue publicado por Stephenson y Mitalas en el año 1967. El problema reside en que las funciones que representan las excitaciones no son continuas, ya que solamente se disponen de datos horarios de temperaturas y radiación, por lo tanto hay que reconstruirlas. La manera de reconstruirlas es utilizando un elemento formador (hold function, en la literatura inglesa) que suele ser una función triángulo. En el caso del programa vpCLIMA hemos utilizado esta función como elemento formador de la función de excitación.

Los factores de respuesta son el conjunto de valores muestreados cada cierto intervalo de tiempo (1 hora normalmente) de la respuesta de densidad de flujo de calor que se obtienen cuando se aplica la función de excitación unitaria.

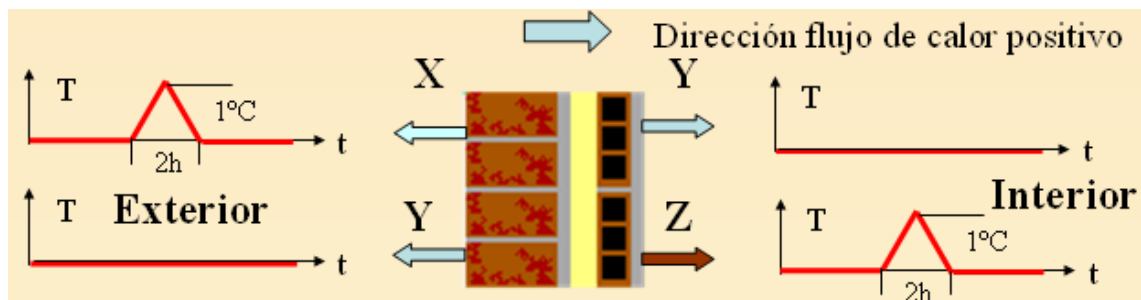
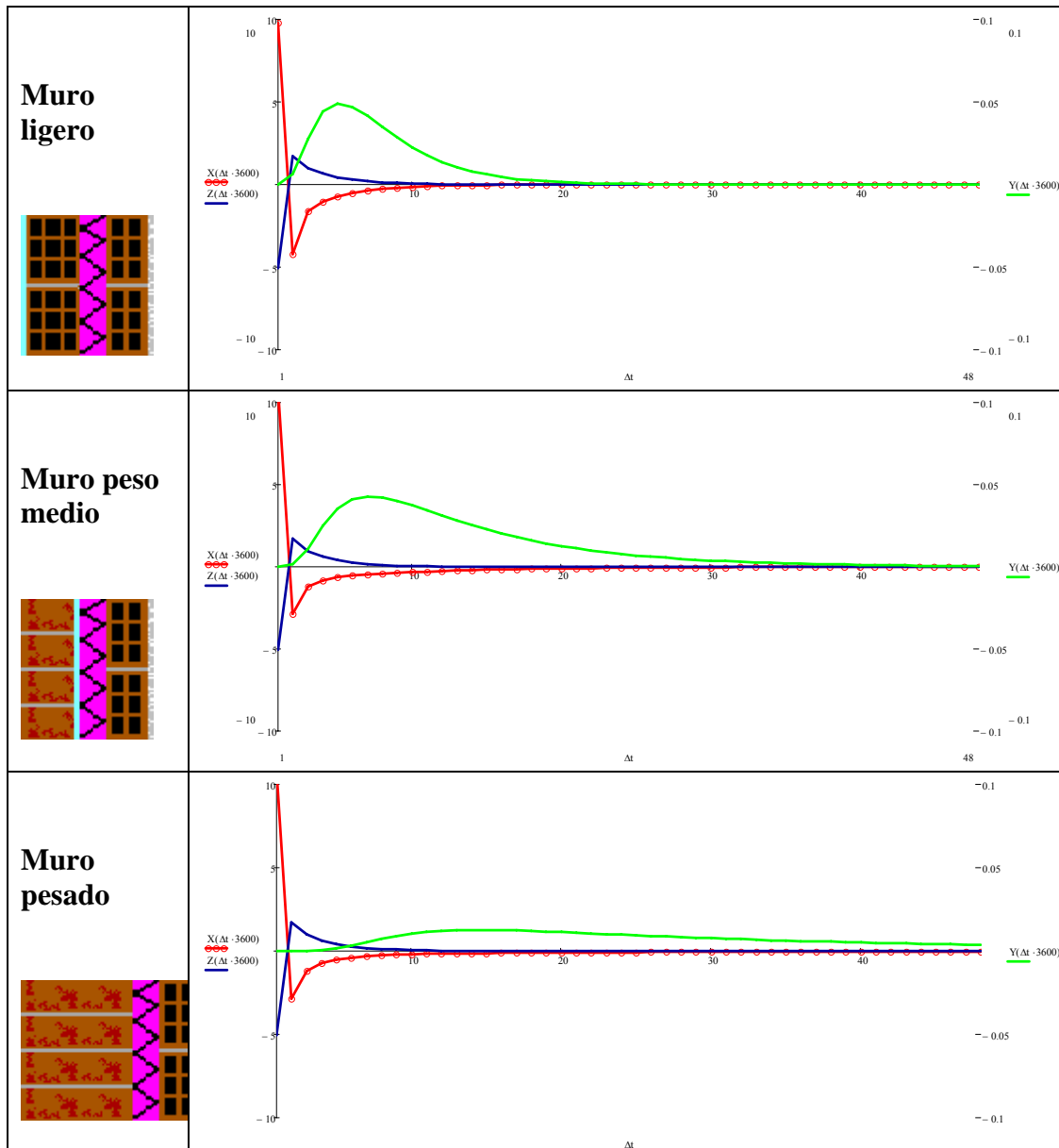


Figura 137: Representación de la excitación en temperatura y flujos de calor superficiales.

Se definen los coeficientes:

- $X(i)$ : Flujo de calor en la hora "i" por la cara exterior cuando se realiza la excitación triángulo de temperatura en el exterior ( $W/m^2$ ).
- $Y(i)$ : Flujo de calor en la hora "i" por la cara interior de la pared cuando se realiza la excitación triángulo de temperatura en el exterior ( $W/m^2$ ) (Es igual al flujo de calor en la hora "i" por la cara exterior de la pared cuando se realiza la excitación triángulo de temperatura en el interior).

- $Z(i)$ : Flujo de calor en la hora “i” por la cara interior de la pared cuando se realiza la excitación triángulo de temperatura en el interior ( $W/m^2$ ).



**Tabla 6: Representación de los factores de respuesta  $X(j)$ ,  $Y(j)$  y  $Z(j)$  de tres muros.**

La determinación de dichos coeficientes se puede realizar mediante métodos numéricos, métodos experimentales o de forma analítica a partir de los espesores, densidades, capacidades caloríficas, conductividades de los diferentes capas de materiales que componen el cerramiento y su orden (no tiene el mismo comportamiento en función de donde esté colocado el aislamiento, exterior/interior).

La aproximación más utilizada para recrear la función de excitación consiste en utilizar un triángulo de altura la unidad como elemento formador, de esta manera se consigue obtener una función de excitación continua cuyos puntos se unen mediante rectas.

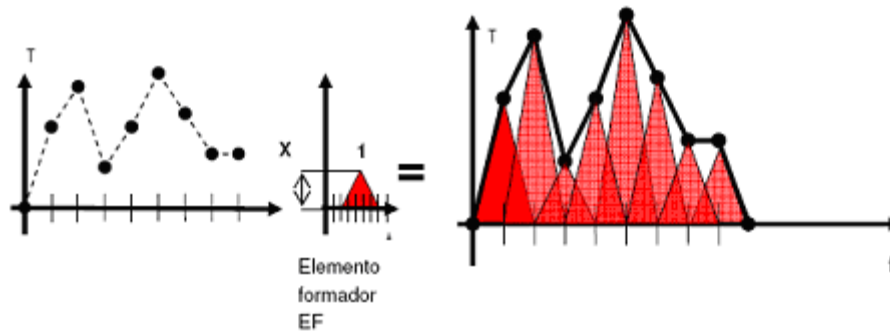


Figura 138 :La función triángulo utilizada como elemento formador (hold function).

Los coeficientes globales de convección utilizados tanto en la superficie interior como en la exterior del muro,  $h_{cr}$ , tienen en cuenta los intercambios de calor por convección y por radiación de longitud de onda larga. De esta manera, los factores de respuesta se definen entre las temperaturas de los ambientes del muro y no entre las temperaturas superficiales del mismo.

Como particularidad de los factores de respuesta podemos afirmar que la suma de cada uno de ellos coincide, en valor absoluto, con el coeficiente global de transmisión de calor en régimen estacionario definido para el muro, es decir:

$$U = \sum_{i=0}^{\infty} Y(i) = -\sum_{i=0}^{\infty} Z(i) = \frac{1}{\frac{1}{h_{cr\_int}} + \sum_{capas} \frac{espesor}{k} + \frac{1}{h_{cr\_ext}}}$$

Ecuación 19

La cantidad de calor que se transfiere al interior del recinto, parte por convección y parte por radiación, que se ha denominado ganancia se determina en base a los coeficientes de los factores de respuesta de la siguiente manera:

$$G_{cerra}(n) = A_{pared} \sum_{i=0}^{\infty} T_{s,ext}(n-i)Y(i) + A_{pared} \sum_{i=0}^{\infty} T_{s,int}(n-i)Z(i)$$

Ecuación 20

### 8.2.2. COEFICIENTE GLOBAL DE CONVECCIÓN-RADIACIÓN INTERIOR Y TEMPERATURA INTERIOR

El intercambio de calor de un cerramiento con el resto de superficies que componen el recinto puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q_{cerra}(n) = A_{pared} h_{c,int} (T_{pared}(n) - T_{s,int}(n)) + \sum_{pareds} \sigma \frac{T_{pared}(n)^4 - T_{pi}(n)^4}{R_{pared-pi}}$$

Ecuación 21

donde se estima que la cantidad de calor por conducción del cerramiento es igual a la cantidad intercambiada por convección y radiación del mismo con el aire interior y las superficies interiores restantes. El término  $R_{pared-pi}$  representa la resistencia

térmica al intercambio de calor por radiación entre la pared considerada y los demás cerramientos y objetos que conforman el recinto. La estimación de este valor es algo complicada y depende de los factores de forma del recinto y las propiedades radiantes de las diferentes superficies.

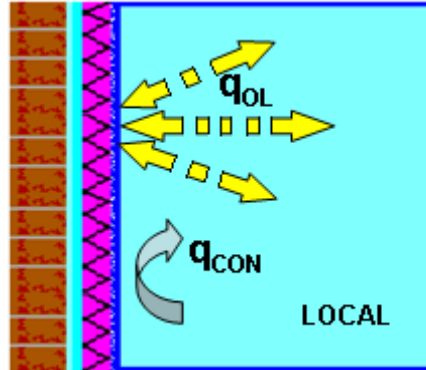


Figura 139: Balance flujos de calor en superficie interior del muro.

Una de las consideraciones que se toman es que la diferencia de temperaturas entre superficies es pequeña, por lo que se puede linealizar el intercambio de calor por radiación sin perder demasiada precisión:

$$Q_{cerra}(n) = A_{pared} hc_{int} (T_{pared}(n) - T_{s,int}(n)) + \sum_{paredes} A_{pared} hr_{pared-pi} (T_{pared}(n) - T_{pi}(n))$$

**Ecuación 22**

donde el coeficiente equivalente de radiación  $hr_{pared-pi}$  se define como:

$$hr_{pared-pi} = \sigma \frac{T_{pi}(n)^2 + T_{pared}(n)^2}{A_{pared} R_{pared-pi}} (T_{pi}(n) + T_{pared}(n))$$

**Ecuación 23**

De esta manera, el flujo de calor puede expresarse como:

$$Q_{cerra}(n) = A_{pared} hcr_{int} (T_{pared}(n) - T_{aire}^*(n))$$

**Ecuación 24**

donde el coeficiente de radiación-convección representa:

$$hcr_{int} = hc_{int} + \sum_{paredes} hr_{pared-pi}$$

**Ecuación 25**

mientras que el parámetro  $T_{aire}^*$  indica:

$$T_{aire}^*(n) = \frac{hc_{int} T_{s,int}(n) + \sum_{paredes} hr_{pared-pi} T_{pi}(n)}{hcr_{int}}$$

**Ecuación 26**

Normalmente toma la simplificación de considerar que las temperaturas de las paredes son muy próximas a las del aire del local, por tanto  $T_{aire}^*(n) \approx T_{s,int}(n)$ .

El CTE-HE1 ofrece los siguientes coeficientes globales de convección-radiación interior y exterior a utilizar:

	<i>Muro Exterior</i>		<i>Muro Otro.amb.</i>	
	<i>Rsi</i>	<i>Rse</i>	<i>Rsi</i>	<i>Rse</i>
<b>Cerramientos verticales inclinación &gt;60°</b>	0,13	0,04	0,13	0,13
<b>Cerr. Horiz. Flujo ascendente inclinación ≤60°</b>	0,1	0,04	0,1	0,1
<b>Cerr. Horiz. Flujo descendente inclinación ≤60°</b>	0,17	0,04	0,17	0,17

Tabla 7: Resistencias térmicas globales interiores y exteriores

### 8.2.3. COEFICIENTE GLOBAL DE CONVECCIÓN-RADIACIÓN EXTERIOR Y TEMPERATURA SOL-AIRE

En la siguiente figura se representan los intercambios de energía que aparecen en un cerramiento en contacto con el exterior.

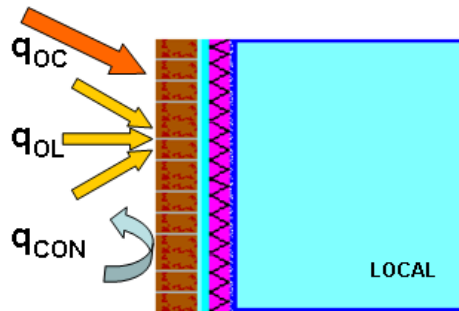


Figura 140: Balance de calor en superficie exterior del muro.

En la figura se representa el calor que se transfiere en la cara exterior de un muro, en la cual se observa el intercambio de calor por convección, intercambio por radiación con longitud de onda larga con el entorno y con el cielo (sin sol), e intercambio con longitud de onda corta por incidencia de la radiación solar.

$$Q_{ext} = Q_{CONV} + Q_{RAD}^{OC} + Q_{RAD}^{OL}$$

Ecuación 27

Desarrollando cada uno de los términos de la ecuación queda la siguiente expresión para un instante “n”:

$$Q_{ext}(n) = A_{pared} hc_{ext} (T_{s,ext}(n) - T_{p,ext}(n)) + \alpha A_{pared} I_T(n) + \sigma \frac{T_{entorno}(n)^4 - T_{p,ext}(n)^4}{R_{p,ext-entorno}} + \sigma \frac{T_{cielo}(n)^4 - T_{p,ext}(n)^4}{R_{p,ext-cielo}}$$

Ecuación 28



Donde:

- $\alpha$  representa el coeficiente de absorción de la pared exterior a radiaciones de baja longitud de onda (del orden de 0,6 para paredes claras, 0,75 para color medio y 0,9 para paredes oscuras).
- $I_T(n)$  la radiación solar que incide sobre dicho cerramiento por metro cuadrado de superficie.
- $T_{\text{cielo}}(n)$  la temperatura equivalente de cielo con su correspondiente coeficiente de emisión. Una primera aproximación a este fenómeno consistiría en suponer el cielo como un cuerpo negro a una temperatura algo inferior a la del ambiente (que puede oscilar entre 1°C y 10°C, dependiendo de la existencia o no de nubes).

Como en el caso anterior linealizando el intercambio de calor radiante (de longitud de onda larga) podemos expresar la anterior ecuación como:

$$Q_{\text{ext}}(n) = A_{\text{pared}} hc_{\text{ext}} (T_{s,\text{ext}}(n) - T_{p,\text{ext}}(n)) + \alpha A_{\text{pared}} I_T(n) + A_{\text{pared}} hr_{p,\text{ext-entorno}} (T_{\text{entorno}}(n) - T_{p,\text{ext}}(n)) + A_{\text{pared}} hr_{p,\text{ext-cielo}} (T_{\text{cielo}}(n) - T_{p,\text{ext}}(n))$$

**Ecuación 29**

Y así mismo:

$$Q_{\text{ext}}(n) = A_{\text{pared}} hcr_{\text{ext}} (T_{sa}^*(n) - T_{p,\text{ext}}(n))$$

**Ecuación 30**

siendo el coeficiente de convección-radiación equivalente:

$$hcr_{\text{ext}} = hc_{\text{ext}} + hr_{p,\text{ext-entorno}} + hr_{p,\text{ext-cielo}}$$

**Ecuación 31**

y el valor la expresión de la temperatura sol-aire,  $T_{sa}^*$ :

$$T_{sa}^*(n) = \frac{hc_{\text{ext}} T_{s,\text{ext}}(n) + hr_{p,\text{ext-entorno}} T_{\text{entorno}}(n) + hr_{p,\text{ext-cielo}} T_{\text{cielo}}(n) + \alpha I_T(n)}{hcr_{\text{ext}}}$$

**Ecuación 32**

En la definición de la temperatura sol-aire el primer término depende de la temperatura de la superficie de los alrededores (próxima a la temperatura ambiente), y de la temperatura de cielo, que en todo caso es inferior al ambiente. En simulación es importante mantener el efecto de dicha temperatura de cielo, pues esto representa un enfriamiento de dicho cerramiento (sobre todo por la noche en el techo), y puede ser significativo en la energía total transferida a lo largo del año. En cálculo de cargas si consideramos ese primer término como la temperatura del aire estaremos maximizando las mismas, ya que en todo caso en la realidad pudiera ser algo inferior por la influencia de la temperatura de cielo.

Así pues definimos finalmente una temperatura sol aire, (temperatura a la que vamos a considerar el aire exterior y vamos a prescindir de la radiación solar que está incidiendo sobre el cerramiento) como:

$$T_{sa}(n) = T_{s,ext}(n) + \frac{\alpha I_T(n) - f_{muro-cielo} h r_{p,ext-cielo} \Delta T_c}{h c r_{ext}}$$

**Ecuación 33**

siendo la diferencia de temperaturas entre el aire exterior y el cielo la expresión:

$$\Delta T_c = T_{s,ext} - T_{cielo}$$

**Ecuación 34**

y representando el  $f_{muro-cielo}$  el factor de forma entre la superficie y el cielo.

Por tanto, la temperatura sol-aire nos permite conocer la cantidad de calor que entra por conducción desde el exterior en cada instante. La temperatura sol-aire es un parámetro que depende de varios factores:

- La radiación solar
- El factor de visión del cielo y alrededores
- La temperatura seca exterior

La temperatura de cielo,  $T_{cielo}$ , se puede determinar según la expresión descrita por Martin y Berdahl (Ref. 42), tal como utiliza el programa Trnsys (Ref. 41):

$$T_{cielo} = T_{amb} [\varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) C_{Cover} 0.8]^{0.25}$$

**Ecuación 35**

evaluando la emisividad,  $\varepsilon_0$ , con la expresión:

$$\varepsilon_0 = 0.711 + 0.005 T_{sat} + 7.3 \cdot 10^{-5} T_{sat}^2 + 0.013 \cos\left(2\pi \frac{hora}{24}\right) + 12 \cdot 10^{-5} (p_{atm} - p_0)$$

**Ecuación 36**

y calculando el factor de nubosidad del cielo,  $C_{Cover}$ , con el ecuación:

$$C_{Cover} = \left(1.4286 \frac{E_{Dif}}{E_{Glob,H}} - 0.3\right)^{0.5}$$

**Ecuación 37**

### 8.3. TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE MUROS Y SUELOS ENTERRADOS

Para el cálculo del flujo a través de suelos y muros en contacto con el terreno o vacío sanitario es de aplicación la Norma EN ISO 13370 (1998). En general en dicha norma estima el flujo de calor máximo mensual mediante la expresión:

$$Q = L_s (T_{s,ext,media} - T_{s,int,media}) + L_{pe} (T_{s,ext,mes} - T_{s,ext,media})$$

**Ecuación 38**

Donde:

- $T_{s,int,media}$  representa la temperatura media interior anual (°C). En general se asume 22,5°C
- $T_{s,ext,media}$  representa la temperatura media exterior anual (°C).
- $T_{s,ext,mes}$  representa la temperatura media exterior ese mes (Julio/Agosto para refrigeración y Enero para calefacción).
- $L_s$  es el coeficiente de acoplamiento térmico en régimen estacionario (W/K)
- $L_{pe}$  es el coeficiente de acoplamiento térmico periódico exterior (W/K)

Las expresiones para obtener el valor de los parámetros  $L_s$  y  $L_{pe}$  depende del tipo de cerramiento:

- **Muro enterrado**

$$L_s = A_{muro} \frac{2\lambda}{\pi z} \left( 1 + \frac{0,5(w + \lambda(R_{si} + R_s + R_{se}))}{w + \lambda(R_{si} + R_s + R_{se}) + z} \right) \ln \left( \frac{z}{\lambda(R_{si} + R_w + R_{se})} + 1 \right)$$

**Ecuación 39**

$$L_{pe} = 0,37P\lambda 2(1 - e^{-z/\delta}) \ln \left( \frac{\delta}{\lambda(R_{si} + R_w + R_{se})} + 1 \right)$$

**Ecuación 40**

- **Suelo al terreno**

$$L_s = A_{suelo} \frac{2\lambda}{2\pi \frac{A_{suelo}}{P} + w + \lambda(R_{si} + R_s + R_{se}) + \frac{z}{2}} \ln \left( \frac{2\pi \frac{A_{suelo}}{P}}{w + \lambda(R_{si} + R_s + R_{se}) + \frac{z}{2}} + 1 \right)$$

**Ecuación 41**

$$L_{pe} = 0,37P\lambda e^{-z/\delta} \ln \left( \frac{\delta}{\lambda(R_{si} + R_s + R_{se})} + 1 \right)$$

**Ecuación 42**

- **Suelo a vacío sanitario**

$$L_s = \frac{A_{suelo}}{\left( \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \right)}$$

**Ecuación 43**

$$L_{pe} = U_f \frac{0,37P\lambda \ln\left(\frac{\delta}{w + \lambda(R_{si} + R_s + R_{se})} + 1\right) + U_x A_{suelo}}{\frac{\lambda}{\delta} + U_x + U_f}$$

**Ecuación 44**

Siendo:

- $\lambda$  Conductividad térmica del suelo (2 W/mK por defecto)
- $w$  Espesor del muro (m)
- $R_{si}$  Resistencia superficial interior (0,17 m<sup>2</sup>K/W)
- $R_{se}$  Resistencia superficial exterior (0,04 m<sup>2</sup>K/W)
- $R_s$  Resistencia de las capas de material que componen el suelo (m<sup>2</sup>K/W)
- $R_w$  Resistencia de las capas de material que componen la pared (m<sup>2</sup>K/W)
- $P$  Perímetro que da al exterior (m)
- $z$  Profundidad (m)
- $\delta$  Penetración periódica (m) (2,2 por defecto)
- $U_f$  Coeficiente de transmisión térmica del suelo sobre la cámara de aire (cálculo según la Norma EN ISO 6946), en W/m<sup>2</sup>K.
- $U_g$  Coeficiente de transmisión térmica que corresponde al flujo de calor a través del terreno, en W/m<sup>2</sup>K.
- $U_x$  Coeficiente de transmisión térmica equivalente entre el espacio bajo el suelo y el exterior, en W/m<sup>2</sup>K.

#### 8.4. TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS EN CONTACTO CON LOCALES NO CALEFACTADOS

En general es muy difícil estimar con precisión la temperatura de los locales que no están climatizados, realmente se deberían realizar balances de energía y considerar dichos espacios como unos recintos más en el cálculo, pero para ello es necesario conocer sus características: superficies, composición de las paredes, ventilación, etc. lo cual resulta prácticamente imposible si el local no pertenece al propio edificio. Una primera aproximación consiste en realizar un balance de energía en estado estacionario en dicho local, sin contar las posibles aportaciones solares ni cargas internas, de manera que se consideran los intercambios de calor del mismo con los elementos de alrededor:

- Calor transferido desde el exterior y desde el terreno a dicho local:

$$Q_{local,ady,ext} = AU_{local,ady,ext}(T_{s,ext,mes} - T_{local,ady}) + AU_{local,ady,terr}(T_{terreno} - T_{local,ady})$$

**Ecuación 45**

- Calor intercambiado por ventilación del local:

$$Q_{local,ady,vent} = nr_{local,ady,ext} V_{local,ady,ext} \rho Cp (T_{s,ext,mes} - T_{local,ady})$$

**Ecuación 46**

El grado de ventilación del local adyacente se puede determinar a partir de su nivel de estanqueidad, de acuerdo con la siguiente tabla:

<b>Nivel estanqueidad</b>	<b>Características</b>	<b>renov/h</b>
1	Ni puertas, ni ventanas, ni aberturas de ventilación	0
2	Todos los componentes sellados, sin aberturas de ventilación	0,5
3	Todos los componentes bien sellados, pequeñas aberturas de ventilación	1
4	Poco estanco, a causa de juntas abiertas o presencia de aberturas de ventilación permanentes	5
5	Poco estanco, con numerosas juntas abiertas o aberturas de ventilación permanentes grandes o numerosas	10

**Tabla 8: Número de renovaciones en función del grado de estanqueidad.**

El calor transferido desde nuestro espacio a dicho local puede describirse con la siguiente expresión:

$$Q_{local,ady,espacio} = AU_{local,ady,espacio} (T_{local,ady} - T_{s,int})$$

**Ecuación 47**

Realizando un balance con los anteriores flujos de calor obtenemos

$$T_{local,ady} = \frac{(AU_{local,ady,ext} + nr_{local,ady,ext} V_{local,ady,ext} \rho C_p) T_{s,ext,mes} + AU_{local,ady,terr} T_{terreno} + AU_{local,ady,espacio} T_{s,int}}{AU_{local,ady,ext} + nr_{local,ady,ext} V_{local,ady,ext} \rho C_p + AU_{local,ady,terr} + AU_{local,ady,espacio}}$$

**Ecuación 48**

Finalmente si no conocemos la temperatura del terreno se podría aproximar como la temperatura media ambiente del mes.

Como se ha señalado en ocasiones anteriores, se desconocen las dimensiones del local adyacente, la composición de sus cerramientos, o su nivel de estanqueidad, y se toma como temperatura práctica una temperatura intermedia entre la del local y la exterior. Esta práctica puede ser razonable en refrigeración, pero crítica en calefacción, sobre todo si existe mucha superficie con ese local no acondicionado, lo que puede producir una carga excesiva. En dichos casos se aconseja utilizar la expresión anterior.

## **8.5. TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE SUPERFICIES SEMITRANSSPARENTES**

Las puertas, ventanas y claraboyas son elementos clave a la hora de hacer el balance térmico del edificio. La transmisión de calor a través de estos elementos tiene un comportamiento distinto al que existe en los cerramientos ya que se trata de elementos de menor espesor, con menor número de capas y permiten el paso de la radiación a través de los mismos. Los procesos de transmisión de calor que tienen lugar en una superficie acristalada se comentan a continuación y se simbolizan en la siguiente figura:

- Reflexión, absorción y transmisión de la radiación solar, tanto de la componente directa como la difusa,

- Intercambio de calor por conducción y convección,
- Puentes térmicos en los huecos (ventanas y puertas).
- Infiltraciones en los huecos y en las posibles cajas de persianas.

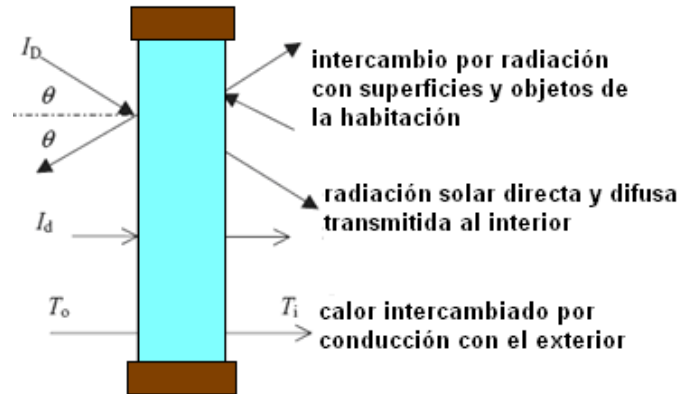


Figura 141: Intercambios de energía de un cerramiento semitransparente.

### 8.5.1. REFLEXIÓN, ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN DE RADIACIÓN EN UNA SUPERFICIE ACRISTALADA.

Cuando un rayo solar incide directamente sobre una superficie exterior de vidrio se producen varios efectos, parte de la radiación incidente es reflejada nuevamente hacia el exterior, otra parte es absorbida por la masa del vidrio y una tercera parte atraviesa el vidrio y se transmite por la otra superficie.

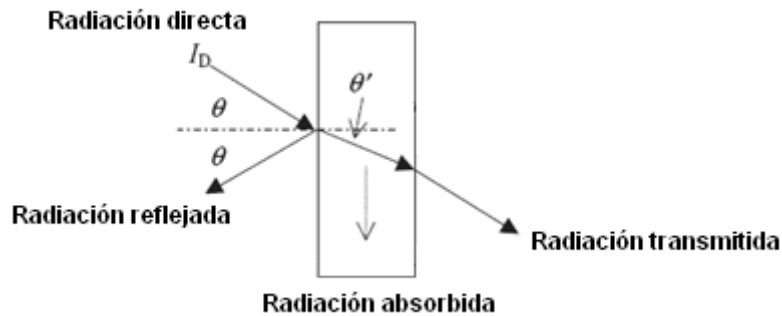


Figura 142: Representación de la incidencia de la radiación sobre el vidrio.

El cálculo de la energía reflejada, absorbida y transmitida se hace en base a unos coeficientes cuyos valores dependen de dos variables:

- **Coefficiente de transmisión del cristal por un único paso** ( $\tau_{abs,1}$ )

El coeficiente de transmisión de un medio se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\tau_{abs,1} = e^{-K_e \cdot L}$$

Ecuación 49

siendo,

- $Ke$  el coeficiente de extinción del material
- $L$  el espesor de la superficie acristalada en la dirección de los rayos solares

- **El coeficiente de reflexión del cristal ( $\rho_c$ )**

Para vidrios cuyas superficies no están especialmente tratadas el coeficiente de reflexión depende del ángulo de incidencia de la radiación y del ángulo de refracción, mediante la expresión de Fresnel:

$$\rho_c = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta - \theta')}{\sin^2(\theta + \theta')} + \frac{\tan^2(\theta - \theta')}{\tan^2(\theta + \theta')} \right]$$

**Ecuación 50**

siendo,

- $\theta$  el ángulo de reflexión, y
- $\theta'$  el ángulo de refracción

- **Coefficiente global de transmisión**

$$\tau = \frac{(1 - \rho_c)^2 \tau_{abs,1}}{1 - (\rho_c \tau_{abs,1})^2}$$

**Ecuación 51**

- **Coefficiente global de reflexión**

$$\rho = \rho_c + \frac{(1 - \rho_c)^2 \rho_c \tau_{abs,1}^2}{1 - (\rho_c \tau_{abs,1})^2}$$

**Ecuación 52**

- **Coefficiente global de absorción**

$$\alpha = 1 - \rho_c - \frac{(1 - \rho_c)^2 \tau_{abs,1}}{1 - (\rho_c \tau_{abs,1})^2}$$

**Ecuación 53**

La ganancia de radiación solar que atraviesa el hueco en un determinado momento se estima mediante la expresión:

$$G_{rad}(n) = A \cdot \tau \cdot Fs_H \cdot I_T(n)$$

**Ecuación 54**

siendo,

- $G_{rad}(n)$  es la ganancia de radiación a través del hueco en el instante “n”.
- $A$  es la superficie del hueco.
- $I_T(n)$  la radiación total sobre la superficie del hueco en el instante “n”.

- $F_{s_H}$  el factor solar del hueco en tanto por uno.

El factor solar del hueco,  $F_{s_H}$ , se define como el porcentaje de energía finalmente transmitida al interior respecto a la incidente en dirección normal, en él se incluye el efecto del marco y la reducción solar dependiendo de los accesorios que posea el hueco, de esta manera, el cálculo del factor solar se expresa como se muestra a continuación:

$$F_{s_H} = (1 - FM) \cdot g_{\perp} \cdot f_{F,acc} + FM \cdot 0,04 \cdot U_{H,m} \cdot \alpha$$

**Ecuación 55**

donde,

- $FM$  es la fracción de marco del hueco en tanto por uno.
- $g_{\perp}$  es el factor solar de la parte semitransparente del hueco a incidencia normal. Puede obtenerse mediante la Norma UNE EN 410:1998. Es un dato del fabricante del vidrio.
- $U_{H,m}$  representa la transmitancia térmica del marco del hueco, en  $\frac{kW}{m^2 \cdot K}$ .
- $f_{F,acc}$  es el porcentaje de reducción solar dependiendo de los accesorios y según la Norma prEn 13363-1 toma los valores que se muestran en la tabla.
- el segundo término de la expresión suele ser despreciable.

Posición	Transmisividad	Color	Tipo de acristalamiento			
			Simple	Doble	Triple	Doble bajo emisivo
Interior	Opaca	Blanco	0,33	0,43	0,52	0,47
		Pastel	0,45	0,55	0,63	0,6
		Oscuro	0,58	0,68	0,74	0,73
		Negro	0,7	0,8	0,85	0,85
	Medio translúcida	Blanco	0,44	0,52	0,59	0,55
		Pastel	0,56	0,64	0,7	0,68
		Oscuro	0,69	0,76	0,81	0,81
		Negro	0,75	0,83	0,87	0,87
	Muy translúcida	Blanco	0,61	0,67	0,72	0,7
		Pastel	0,67	0,73	0,78	0,76
		Oscuro	0,73	0,79	0,83	0,82
		Negro	0,79	0,85	0,89	0,89
Exterior	Opaca	Blanco	0,05	0,04	0,04	0,03
		Pastel	0,08	0,07	0,06	0,05
		Oscuro	0,12	0,09	0,08	0,06
		Negro	0,15	0,12	0,11	0,08
	Medio translúcida	Blanco	0,25	0,25	0,25	0,23
		Pastel	0,28	0,27	0,27	0,25
		Oscuro	0,31	0,3	0,3	0,27
		Negro	0,33	0,31	0,31	0,28
	Muy translúcida	Blanco	0,46	0,47	0,47	0,45
		Pastel	0,48	0,48	0,49	0,46
		Oscuro	0,5	0,49	0,5	0,47
		Negro	0,51	0,51	0,51	0,48

**Tabla 9: Porcentaje de reducción solar dependiendo de los accesorios, Norma prEn 13363-1.**



La ganancia de calor en forma de radiación solar que entra a través de los huecos no tiene un efecto inmediato sobre la temperatura del aire del local. Se considera que la radiación entra en el espacio, parte se transmite en convección al aire y el resto se almacena por los elementos interiores del recinto, los cuales lo van cediendo al ambiente con más o menos retardo. Para calcular la carga producida por la ganancia solar en un instante determinado se aplica la metodología Radiant Time Series, con lo que la expresión que describe su efecto se muestra a continuación:

$$Q_{rad}(n) = C G_{rad}(n) + \sum_{j=0}^{23} (1-C) G_{rad}(n-j) TRS_{Solar}(j)$$

**Ecuación 56**

donde,

- $C$  representa la fracción convectiva cuyos valores son:
  - o  $C = 0$  si no existen elementos de sombra interiores.
  - o  $C = 0,67$  si existen elementos de sombra interiores y el factor solar es mayor que 0,5.
  - o  $C = 0,54$  si existen elementos de sombra interiores y el factor solar es menor o igual que 0,5.
- $TRS_{Solar}(j)$  representa los valores de la serie de radiación temporal para la radiación solar sobre el tipo de zona en el que se aplique y con los acabados de suelo que existan en la misma.
- $G_{rad}(n)$  es el valor de radiación solar que entra en el espacio en la hora “n”.

### 8.5.2. INTERCAMBIO DE CALOR POR CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN

El flujo de calor por conducción-convección se calcula de la siguiente manera, al no considerar inercia:

$$q_{cond}(n) = U_H (T_{ext}(n) - T_{int})$$

**Ecuación 57**

siendo,

- $T_{ext}, T_{int}$  las temperaturas exteriores e interior del local.
- $U_H$  el coeficiente global de transferencia de calor del hueco, en  $\frac{kW}{m^2 \cdot K}$ .

El valor del coeficiente global de transmisión  $U_H$  se determina en función de los coeficientes de transferencia de calor del vidrio y del marco, además de la fracción de marco que posee el hueco, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$U_H = (1 - FM) U_{H,v} + FM U_{H,m}$$

**Ecuación 58**

Siendo,

- $FM$  la fracción de marco del hueco en tanto por uno.
- $U_{H,v}, U_{H,m}$  los coeficientes transferencia de calor del vidrio y del marco respectivamente, en  $\frac{kW}{m^2 \cdot K}$ .

El valor del coeficiente  $U_H$  debe tener en cuenta también el efecto de la existencia de persianas, cortinas, y más elementos de protección tanto interiores como exteriores en los huecos. La norma CEN prEn 10077-1 establece unos valores de reducción de la transmitancia dependiendo de los accesorios que posea el hueco, en la siguiente tabla se establecen los valores para este efecto, representado con la expresión  $f_{U,acc}$ .

Tipo de persiana	Tipo de acristalamiento			
	Simple	Doble	Triple	Doble bajo emisor
Persiana enrollable de aluminio	0,59	0,74	0,81	0,84
Persiana enrollable de plástico sin relleno de aislante	0,52	0,68	0,76	0,8
Persiana enrollable de plástico con relleno de aislante	0,48	0,64	0,72	0,77
Persianas enrollable de madera	0,52	0,68	0,76	0,8
Persianas de madera de 25 a 30 mm de espesor	0,44	0,6	0,69	0,74

**Tabla 10: valores de  $f_{U,acc}$  para la reducción de la transmitancia en huecos por elementos accesorios.**

Aplicando este nuevo valor a la expresión, el flujo de calor transmitido por conducción-radiación al interior del recinto a través de una superficie acristalada se expresa como:

$$q_{cond}(n) = U_H f_{U,acc} (T_{ext}(n) - T_{int})$$

**Ecuación 59**

## 8.6. TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE PUENTES TÉRMICOS

Uno de los elementos más complejos de valorar en el análisis térmico de los edificios son los puentes térmicos. El cálculo que éstos implican consiste en un problema tridimensional en régimen transitorio, y depende de la configuración concreta del puente térmico, por lo que su resolución es delicada, además deberíamos tener en cuenta el correspondiente Radiant Time Series desarrollados para este caso.

La norma EN ISO 14683 plantea un cálculo sencillo a través de un coeficiente de pérdidas lineal sin inercia térmica (que no deja de ser una primera aproximación al problema real). Así mismo en el programa oficial LIDER de certificación se proponen una serie de puentes térmicos y su coeficiente lineal en función de la posición del aislante, su encuentro, y tipo de puente térmico.

Con esta metodología, se puede estimar la cantidad de calor que pasa a través del puente térmico con la siguiente expresión:

$$Q_{puente} = L_{puente} U (T_{s,ext} - T_{s,int})$$

**Ecuación 60**

Siendo,

- $U$  el coeficiente de transferencia de calor lineal del puente térmico considerado, en  $\frac{kW}{m \cdot K}$ .
- $L_{puente}$  longitud del puente térmico, en caso de tratarse de ventanas será el perímetro del marco, en  $m$ .

## 8.7. CARGAS DEBIDAS A LA VENTILACIÓN E INFILTRACIONES

La introducción de aire exterior en los locales modifica las condiciones del aire interior del recinto, y además lo hace de forma instantánea, por lo que las ganancias por ventilación e infiltraciones se convierten directamente en carga sobre el local.

Para realizar el cálculo de cargas es necesario conocer las condiciones del aire de ventilación, si existe o no recuperador, el tipo y la eficacia del mismo, etc. En el caso del cálculo de infiltraciones el aire que se considera tiene las mismas condiciones que el aire exterior.

En este apartado se realizan dos cálculos, un primero para conocer la aportación de carga sensible del aire y otro para conocer la aportación de carga latente. De esta manera, el cálculo se expresa como sigue:

- Aportación sensible

$$Q_{vent,sen} = V_{vent} (T_{s,vent} - T_{s,int}) \frac{Cp_{as} + W_{vent} Cp_v}{ve_{vent}}$$

**Ecuación 61**

- Aportación latente

$$Q_{vent,lat} = V_{vent} (W_{vent} - W_{int}) \frac{Cf + T_{s,vent} Cp_v}{ve_{vent}}$$

**Ecuación 62**

Siendo,

- $Q$  el flujo de calor, en  $W$ .
- $V_{vent}$  el caudal de aire de ventilación, en  $\frac{m^3}{s}$ .
- $W_{vent}$  la humedad específica en, en  $\frac{kg}{kg_{as}}$ .
- $T$  las temperaturas, en  $K$ .

- $Cp_{as}$  el calor específico aire seco (1000 J/kg°C), en  $\frac{J}{kg \cdot K}$ .
- $Cp_v$  el calor específico vapor de agua (1805 J/kg°C), en  $\frac{J}{kg \cdot K}$ .
- $Cf$  el calor cambio estado vapor –agua a 0°C (2501000 J/kg), en  $\frac{J}{kg}$ .

## 8.8. CARGA APORTADA POR LOS OCUPANTES

El aporte de calor por parte de los ocupantes al aire interior del local se divide en dos tipos, latente y sensible. El primero de ellos es un aporte instantáneo, mientras que el segundo tiene una parte inmediata y otra que se distribuye en el tiempo, para la que se aplica la metodología Radiant Time Series.

El valor de las cargas aportadas por los ocupantes depende fundamentalmente del número de personas, de la actividad que estén desarrollando dentro del recinto, así como el sexo, tamaño (edad) y la temperatura del local. A continuación se muestra una tabla con los valores de calos sensible y latente disipado por las personas en función de su actividad y la temperatura ambiente.

<i>Calor ocupantes</i>		<i>TsL</i>	<i>25°C</i>		<i>23°C</i>		<i>21°C</i>	
<i>Actividad</i>	<i>Q (W)</i>	<i>Qtotal</i>	<i>Qsen</i>	<i>Qlat</i>	<i>Qsen</i>	<i>Qlat</i>	<i>Qsen</i>	<i>Qlat</i>
<b>Sentado reposo</b> (teatro, cine,...)	Hombre	115	76	39	87	28	87	28
	Mujer	90	66	24	67	23	67	23
	media	103	71	31	77	26	77	26
<b>Sentado trabajo</b> <b>muy ligero</b> (Oficina,...)	Hombre	139	84	55	100	39	105	34
	Mujer	109	73	36	81	28	82	27
	media	124	78	46	90	34	94	30
<b>Sentado trabajo</b> <b>ligero</b> (trabajo montaje,..)	Hombre	185	93	92	111	74	129	56
	Mujer	145	79	66	94	51	109	36
	media	165	86	79	103	62	119	46
<b>De pie sin</b> <b>Movimiento</b>	Hombre	139	80	59	95	44	105	34
	Mujer	109	70	39	82	27	82	27
	media	124	75	49	89	35	94	30
<b>De pie trab. Ligero</b> (marcha reducida, tiendas, bancos,..)	Hombre	235	94	141	112	123	130	105
	Mujer	185	83	102	99	86	115	70
	media	210	89	121	106	104	123	87
<b>De pie trab. Moderado</b> (taller, tornero, marcha 1,3 m/s)	Hombre	255	104	151	124	131	144	111
	Mujer	200	92	108	109	91	127	73
	media	227	98	129	116	111	135	92
<b>De pie trab. Pesado</b> (ejercicio físico, baile,...)	Hombre	400	115	285	137	263	159	241
	Mujer	314	102	212	122	192	142	172
	media	357	109	248	130	227	151	206
<b>De pie trab. Muy Pesado</b> (gimnasio)	Hombre	585	154	431	183	402	213	372
	Mujer	460	125	335	149	311	173	287
	media	522	139	383	166	356	193	329

Tabla 11: calor sensible y latente disipado por las personas según distintas variables.

La carga aportada por las personas será función del número de ocupantes, y en el caso de carga sensible deberemos contabilizar el porcentaje que es convectivo y a la parte radiante aplicarle el concepto de Radiant Time Series, así:

- Aportación sensible

$$q_{ocu, sen}(n) = C np(n) g_{sen} + \sum_{j=0}^{23} (1-C) np(n-j) g_{sen} TRS_{NoSolar}(j)$$

**Ecuación 63**

- Aportación latente

$$q_{ocu, lat}(n) = np(n) g_{lat}$$

**Ecuación 64**

Siendo,

- $np(n)$  el número de personas en el instante “n”.

## 8.9. CARGAS DEBIDAS A LA ILUMINACIÓN

La ganancia por iluminación es toda de tipo sensible, y dependiendo del tipo de iluminaria que se emplee el porcentaje que representa la parte convectiva y la radiante difiere.

	<i>Radiación</i>	<i>Convección</i>
<b>Lámparas incandescentes</b>	80%	20%
<b>Fluorescentes</b>	50%	50%
<b>Halógenas</b>	50%	50%

**Tabla 12: Porcentaje convectivo dependiendo del tipo de iluminaria.**

Teniendo en cuenta estos datos y considerando además que algunas iluminarias poseen elementos necesarios para su funcionamiento que también pueden producir carga sensible convectiva, como es el caso de las reactancias en luces fluorescentes o transformadores en el caso de halógenos, y que en general se cifra en un 20% de la potencia de la iluminaria. Así, la expresión que representa la influencia de este agente sobre el aire del local tiene la siguiente forma:

$$Q_{ilum}(n) = (0,2 + C) P_{ilum}(n) + \sum_{j=0}^{23} (1-C) P_{ilum}(n-j) TRS_{NoSolar}(j)$$

**Ecuación 65**

Siendo,

- $P_{ilum}$  Potencia de la iluminación (que está encendida).

## 8.10. CARGAS DEBIDAS A EQUIPOS

En el local pueden existir distintos tipos de equipos, según la función que desempeñe el mismo. En una vivienda se contabilizarían los aparatos electrodomésticos: horno, microondas, televisor, cafetera, etc., mientras que en oficinas podemos encontrar: fotocopiadoras, ordenadores, etc. Según su tipología, los equipos pueden aportar al ambiente calor sensible y/o latente en mayor o menor medida.

A continuación se muestra una tabla orientativa con los equipos más comúnmente considerados, así como el calor generado por los mismos.

<i>Tipo de equipo</i>	<i>Q sensible (W)</i>	<i>Q latente (W)</i>
<i>Ordenador PC</i>	250	0
<i>Proy. Transparencias</i>	300	0
<i>Proy. Diapositivas</i>	200	0
<i>Televisor</i>	100	0
<i>Frigorífico</i>	300	0
<i>Equipo HI-FI</i>	200	0
<i>Copiadora pequeña</i>	1760	0
<i>Copiadora grande</i>	3515	0
<i>Sec. Pelo cabezal</i>	550	100
<i>Sec. Pelo ventil.</i>	675	120
<i>Horno 8kW con campana extrac.</i>	1260	0
<i>Horno 6,6 kW con campana extrac</i>	1055	0
<i>Horno 3 kW con campana extrac</i>	470	0
<i>Cafetera 12L. Con campana extrac.</i>	290	0
<i>Cafetera 12L. Sin campana extrac.</i>	750	250
<i>Cafetera 18L. Con campana extrac.</i>	470	0
<i>Cafetera 18L. Sin campana extrac.</i>	1130	370
<i>Cafetera 30L. Con campana extrac.</i>	615	0
<i>Cafetera 30L. Sin campana extrac.</i>	1525	475

Tabla 13: Potencias y carga orientativa de diferentes equipos.

El modo de aplicar el valor de estas potencias debe tener en cuenta el concepto de Radiant Time Series, para ello es necesario distinguir entre la potencia aplicada de manera inmediata, la parte convectiva, y la parte radiante( aunque en general se considera toda convectiva).

## 8.11. BALANCE TÉRMICO DE UN LOCAL

En el balance de calor sensible de un espacio debe considerarse el aporte térmico de cada una de las cargas descritas en los apartados anteriores, los cuales, sumados a la potencia que pueda contrarrestar el equipo de climatización se igualan a la variación energética con el tiempo del volumen de aire del espacio tal y como se detalla en la siguiente expresión:

$$\rho_a \cdot V \cdot C_a \cdot \frac{\partial T_{int}(t)}{\partial t} = Q_{cerr}(t) + Q_{huec}(t) + Q_{vent,sen}(t) + Q_{inf,sen}(t) + Q_{pt}(t) + Q_{ocu,sen}(t) + Q_{ilu} + Q_{equipos,sen}(t)$$

**Ecuación 66**

Siendo,

- $\rho_a$  la densidad del aire del interior del local
- $V$  el volumen de aire del interior del local
- $C_a$  el calor específico del aire del interior del local
- $T_{int}$  es la temperatura interior del local
- $Q_{cerr}$  es la potencia transmitida a través de los cerramientos del local
- $Q_{huec}$  es la potencia transmitida a través de los cerramientos del local
- $Q_{vent,sen}$  es la parte sensible de la potencia térmica aportada por la ventilación
- $Q_{inf,sen}$  es la parte sensible de la potencia térmica aportada por las infiltraciones
- $Q_{pt}$  es la potencia térmica aportada por los puentes térmicos del local
- $Q_{ocu,sen}$  es la parte sensible de la potencia térmica aportada por los ocupantes.
- $Q_{ilu}$  es la potencia térmica aportada por la iluminación del local
- $Q_{equipos,sen}$  es la parte sensible de la potencia térmica aportada por los equipos.

Una manera de abordar el problema es el método que utilizan los programas DOE-2, Calener-VYP y Calener-GT, el cual consiste en desacoplar la respuesta del edificio y la de los sistemas. A continuación se describen los dos pasos necesarios para desarrollar esta metodología.

En primer lugar se fija la temperatura del aire del local en un valor fijo, con lo que se elimina la dinámica de la temperatura del aire, lo cual implica considerar que los equipos tienen una potencia infinita. Por ejemplo, si la consigna en invierno es de 22°C y en verano de 24°C, se fija una temperatura media de 23°C para todo el año. Con esta consideración, el término de la izquierda de la Ecuación 66 queda igualado a cero:

$$0 = Q_{cerr}(t) + Q_{huec}(t) + Q_{vent,sen}(t) + Q_{inf,sen}(t) + Q_{pt}(t) + Q_{ocu,sen}(t) + Q_{ilu,sen} + Q_{oc,sen}(t) + Q_{equipos,sen}(t)$$

**Ecuación 67**

Es posible que en algunos casos se consideren horarios para los termostatos y se deje oscilar la temperatura libremente durante una serie de horas, en cuyo caso la Ecuación 66 tiene en cuenta el parámetro de evolución de la temperatura pero el valor del calor aportado por los equipos es nulo,  $Q_{equipos,sen}(t) = 0$ . En otras ocasiones puede ocurrir que la potencia que tiene el equipo que abastece la zona no es suficiente para contrarrestar las aportaciones térmicas que tiene el local y por tanto resulta imposible mantener la temperatura ambiente constante, con lo que la temperatura a la que queda el aire del recinto,  $T_f$ , se obtiene del siguiente balance de energía:

$$\begin{aligned}
0 &= Q_{cerr} + Q_{huec} + Q_{vent, sen} + Q_{inf, sen} + Q_{pt} + Q_{ocu, sen} + Q_{ilu, sen} + Q_{oc, sen} + \\
&\Delta Q_{cerr\_ext}(T_f) + \Delta Q_{cerr\_int}(T_f) + \Delta Q_{huec}(T_f) + \Delta Q_{muebles}(T_f) + \Delta Q_{vent, sen}(T_f) + \\
&\Delta Q_{inf, sen}(T_f) + \Delta Q_{pt}(T_f) + \Delta Q_{ocu, sen}(T_f) + \Delta Q_{ilu, sen}(T_f) + \Delta Q_{oc, sen}(T_f) + Q_{equipos, sen}
\end{aligned}$$

**Ecuación 68**

En este balance se tiene en cuenta la energía almacenada en la estructura del edificio, así como el “error” cometido al considerar que la temperatura final no iba a modificarse en la siguiente hora. Las variaciones de calor de la fórmula anterior se expresan de la siguiente manera:

- Variación del aporte de los cerramientos exteriores:

$$\begin{aligned}
\Delta Q_{cerr\_ext}(T_f) &= \sum_{\substack{\text{muros} \\ \text{suelos} \\ \text{techos}}} A_{cerr} [Z(0)(T_{int} - T_f) + Z(1)(T_{int} - T_{f-1}) + Z(2)(T_{int} - T_{f-2}) + Z(3)(T_{int} - T_{f-3}) + \\
&+ Z(4)(T_{int} - T_{f-4}) + Z(5)(T_{int} - T_{f-5}) + Z(6)(T_{int} - T_{f-6}) + Z(7)(T_{int} - T_{f-7})]
\end{aligned}$$

**Ecuación 69**

Los símbolos  $T_{f-1}, T_{f-2}, T_{f-3}, \dots$  representan el valor de la temperatura del aire en instantes anteriores. No se consideran valores mayores de siete para los coeficientes  $Z(n)$  ya que son despreciables.

- Variación del aporte de los cerramientos interiores:

$$\begin{aligned}
\Delta Q_{cerr\_int}(T_f) &= \sum_{\substack{\text{forjado} \\ \text{particiones}}} A_{p\_int} [XYZ(0)(T_{int} - T_f) + XYZ(1)(T_{int} - T_{f-1}) + XYZ(2)(T_{int} - T_{f-2}) + \\
&XYZ(3)(T_{int} - T_{f-3}) + XYZ(4)(T_{int} - T_{f-4}) + XYZ(5)(T_{int} - T_{f-5}) + XYZ(6)(T_{int} - T_{f-6}) + XYZ(7)(T_{int} - T_{f-7})]
\end{aligned}$$

**Ecuación 70**

- Variación del aporte del mobiliario interior del recinto:

$$\begin{aligned}
\Delta Q_{muebles}(T_f) &= A_M [XYZ(0)(T_{int} - T_f) + XYZ(1)(T_{int} - T_{f-1}) + XYZ(2)(T_{int} - T_{f-2}) + XYZ(3)(T_{int} - T_{f-3}) + \\
&A_M XYZ(4)(T_{int} - T_{f-4}) + XYZ(5)(T_{int} - T_{f-5}) + XYZ(6)(T_{int} - T_{f-6}) + XYZ(7)(T_{int} - T_{f-7})]
\end{aligned}$$

**Ecuación 71**

- Variación del aporte de los huecos:

$$\Delta Q_{hueco}(T_f) = \sum_{\text{huecos}} A_{h,M} U_{h,M} (T_{int} - T_f)$$

**Ecuación 72**

- Variación del aporte de la ventilación:

$$\Delta Q_{vent, sen}(T_f) = V_{vent} (T_{int} - T_f) \frac{Cp_{as} + W_{vent} Cp_v}{ve_{vent}}$$

**Ecuación 73**



- Variación del aporte de las infiltraciones:

$$\Delta Q_{inf.,sen}(T_f) = V_{inf} (T_{int} - T_f) \frac{Cp_{as} + W_{inf} Cp_v}{ve_{inf}}$$

**Ecuación 74**

- Variación del aporte de los puentes térmicos:

$$\Delta Q_{pt}(T_f) = \sum_{puente} L_{puente} \left( \frac{U}{L} \right)_{puente} (T_{int} - T_f)$$

**Ecuación 75**

Donde,

- $T_{f-i}$  representa la temperatura del local en la hora i-ésima anterior.

Con estos términos se corrigen aquellos intercambios que dependen de la temperatura del local y se obtiene el valor de la misma.

En cuanto al balance de energía latente, se considera que el local no almacena humedad, por lo que todas las potencias son aplicadas en el mismo instante sobre el ambiente sin retraso temporal. El balance de cantidad de agua en el local viene expresado de la siguiente manera:

$$\Delta Q_{int,lat} = Q_{vent,lat} + Q_{inf,lat} + Q_{ocup,lat} + Q_{equipos,lat}$$

**Ecuación 76**

Siendo,

- $\Delta Q_{int,lat}$  la aportación latente debida a la variación de humedad en el aire interior.

$$\Delta Q_{int,lat} = V_{int} \cdot \frac{Cf + T_{int} Cp_v}{ve_{int}} \cdot (W_{int} - W_{int-1})$$

**Ecuación 77**

Siendo,

- $W_{int}$  la humedad específica del aire del interior del local en el instante actual.
- $W_{int-1}$  la humedad específica del aire del interior del local en el instante anterior.

Balance con el que se obtiene el valor de la humedad específica del local  $W_{int}$ .

## 8.12. BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO

Ref. 34

Jeffrey D.Spitler. "Load Calculation Applications Manual". ASHRAE (2008).

Ref. 35

"Modelling Methods for Energy in Buildings", Underwood, C.P; Yik, F.W.H; Blackwell Science.

Ref. 36

"Energy simulation in building design"; Clarke, J.A; Ed: BH.

Ref. 37

A.Vitti, J.M.Pinazo. "DTIE 2.01 Calidad del ambiente térmico". Ed. Atecyr. Madrid. ISBN 978-84-95010-26-1 (2002)

Ref. 38

"Guía de Condiciones climáticas exteriores de proyecto" IDAE (2009)

Ref. 39

José Manuel Pinazo. "Manual de climatización. Tomo II Cargas térmicas". Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. ISBN 847721-341-0 (1995)

Ref. 40

J.M. Pinazo, Víctor Soto y Otros. "Libro-CD Transmisión de calor". Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. ISBN 84-9705-456-3 (2003)

Ref. 41

"A transient System Simulation Program". Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison. (2000)

Ref. 42

M. Martin, P. Berdahl, "Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States", Lawrence Berkeley Laboratory, University of California – Berkeley, Solar Energy Vol. 33, Nº 3/3, pp. 321-336, 1984.

Ref. 43

"Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER". Guia 8 sobre Calificación Energética de Edificios. IDAE.

Ref. 44

"Sistematización de Acoplamientos Térmicos y Termoeráulicos en la Simulación de Edificios". Tesis doctoral: Rodríguez García, Eduardo (1990).

Ref. 45

"Análisis Dinámico del Comportamiento Térmico de Edificios". Tesis doctoral: Álvarez, Servando (1986).

Ref. 46

"Simulación Energética de Edificios Mediante un Modelo de Respuesta en Frecuencia". Tesis doctoral: Molina Félix, Jose Luis (1987).

## 9. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

### 9.1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO DE REFERENCIA

Para validar el nuevo método de cálculo de sombras se han comparado los resultados obtenidos con el método Shadow Volumes sobre la aplicación AutoCAD con los resultados que se obtienen con el programa de simulación térmica Energy Plus, mediante su interfaz DesignBuilder.

El edificio tomado como ejemplo es un edificio simple, una zona y una planta, pero con una geometría singular en la que se generan diferentes sombras a lo largo del día y del año. En las siguientes figuras se presentan los planos del edificio y las acotaciones correspondientes de cada elemento.

El edificio contiene cuatro ventanas de un metro de altura por dos metros de anchura, cada una de ellas situada en un cerramiento en dirección al Norte, Sur, Este y Oeste respectivamente. La altura del alféizar de cada ventana es de un metro respecto al suelo.

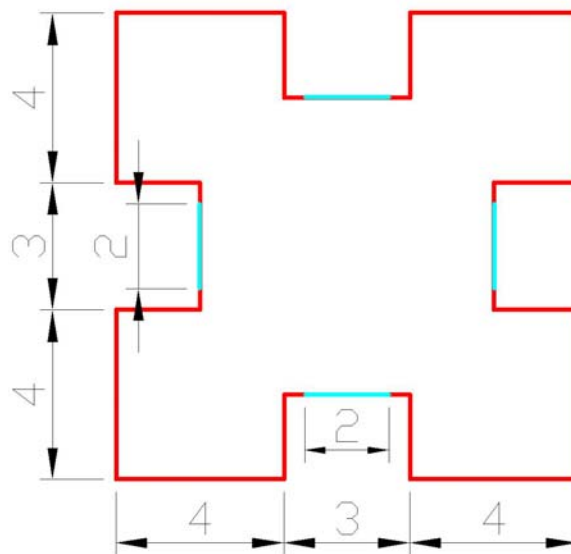


Figura 143: Vista superior acotada del edificio utilizado para la validación.

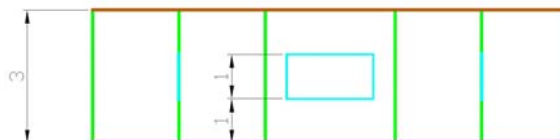
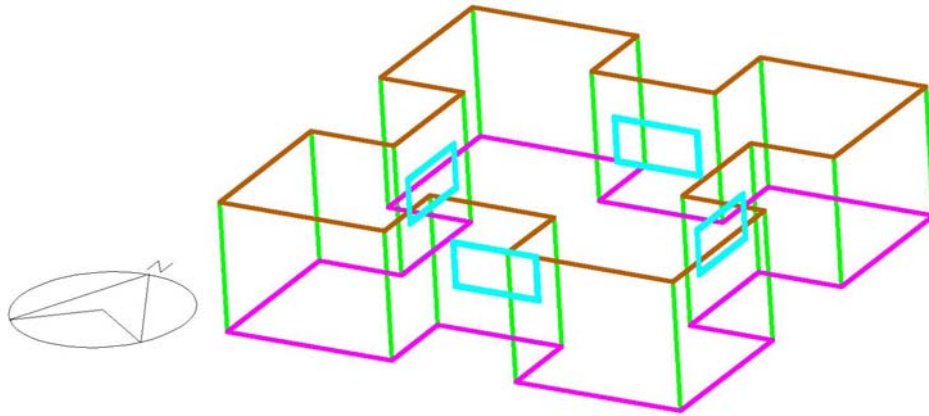
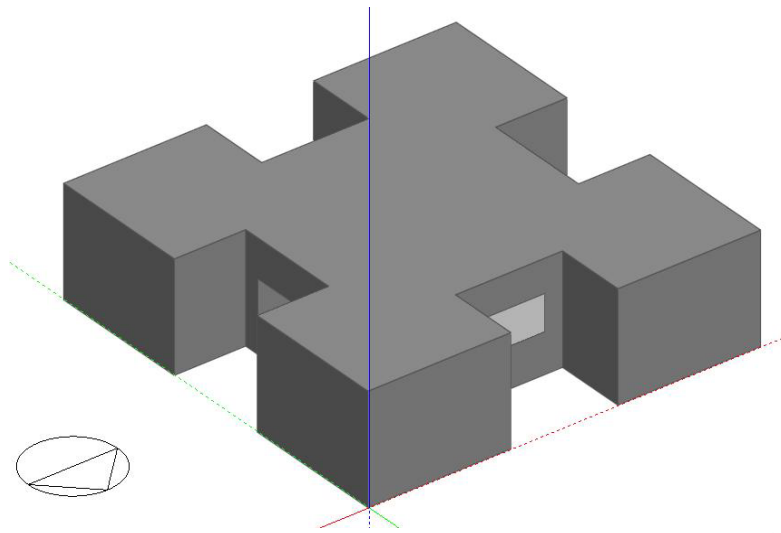


Figura 144: Vista en planta acotada del edificio utilizado para la validación.



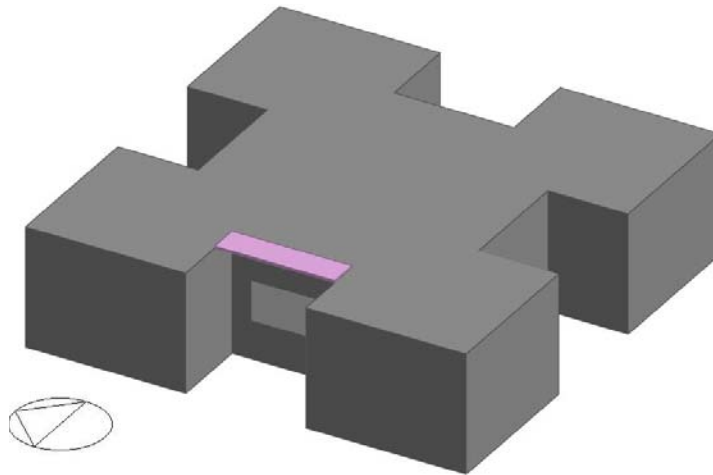
**Figura 145: Vista axonométrica del edificio utilizado para la validación.**



**Figura 146: Vista renderizada del edificio utilizado para la validación.**

Con la geometría del edificio presentado se muestran los efectos que producen las sombras debidas a las paredes laterales sobre las ventanas. En cada una de las direcciones el efecto de las sombras sobre la ventana correspondiente es distinto. Con ello se muestra la capacidad del algoritmo para tener en cuenta este efecto.

Se han generado distintas escenas para el mismo edificio, en concreto se ha colocado un voladizo superior de distintos tamaños y se ha comparado el efecto de cada uno sobre la ventana en ambas aplicaciones.

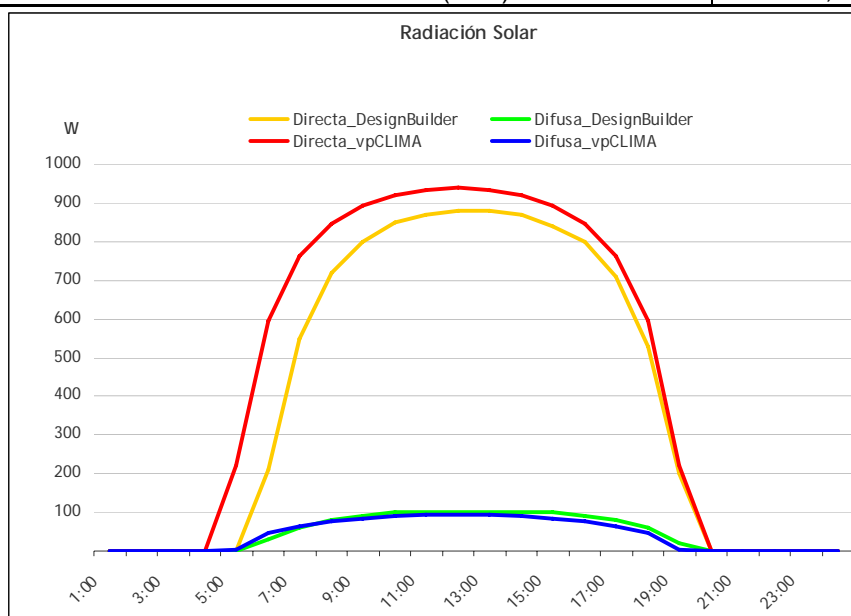


**Figura 147: Edificio ejemplo con el voladizo incorporado.**

## 9.2. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los valores de radiación solar considerados en ambos programas vpCLIMA y EnergyPlus (mediante su “interface” DesignBuilder). En este primer gráfico se muestran los valores para el mes de mayo. Se aprecia que los valores en ambos programas no son exactamente iguales. En el caso del programa vpCLIMA el valor de la radiación directa normal es ligeramente superior, 50 Watios. Otro detalle que se puede observar es la diferencia entre la hora de salida del sol en uno y otro programa. En el caso del vpCLIMA el día es simétrico respecto a las 12:00 horas solares, mientras que en el programa DesignBuilder (cálculos de EnergyPlus) lo es a las 12:30 horas solares. Con todo ello se concluye que ambos programas manejan distintos tipos de modelos para el cálculo de la radiación solar. Teniendo en cuenta estas consideraciones iniciales se obtienen y comparan a continuación los distintos resultados obtenidos en la cantidad de radiación incidente sobre la superficie de los huecos del edificio que sirve de comparativa.

Coeficiente de reflexión de los materiales circundantes (%)	20
Coeficiente de turbiedad atmosférica (beta)	0,03

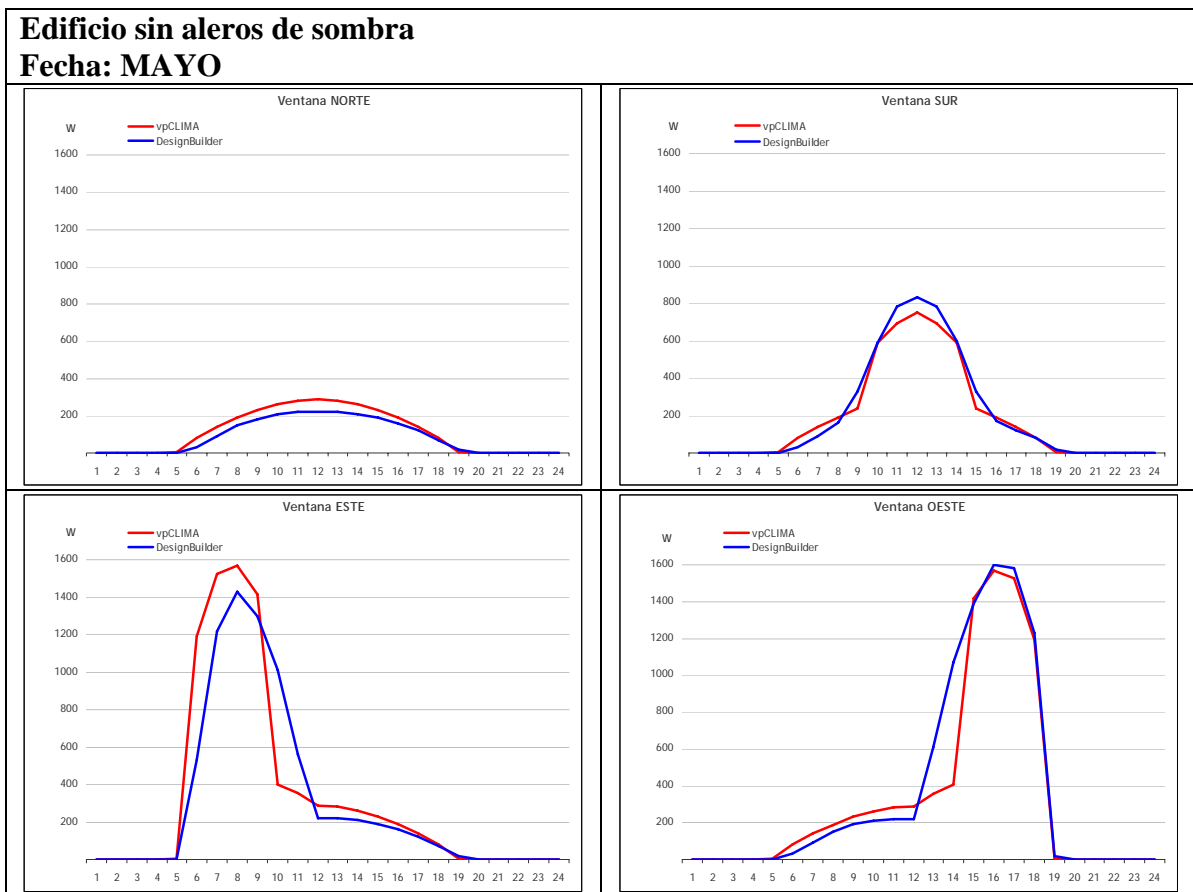


**Gráfica 15: Radiación solar directa normal y difusa en vpCLIMA y DesignBuilder para el mes de mayo.**

Se han comparado los valores obtenidos con la aplicación del método Shadow Volumes sobre la escena de AutoCAD con los valores del programa DesignBuilder. Además de mostrar los valores numéricos de radiación obtenidos en ambos programas se muestran además los resultados geométricos obtenidos tanto en la aplicación AutoCAD, para el caso de los volúmenes de sombra, como en el programa DesignBuilder, el cual posee una aplicación de renderizado y visualización de sombras en el edificio.

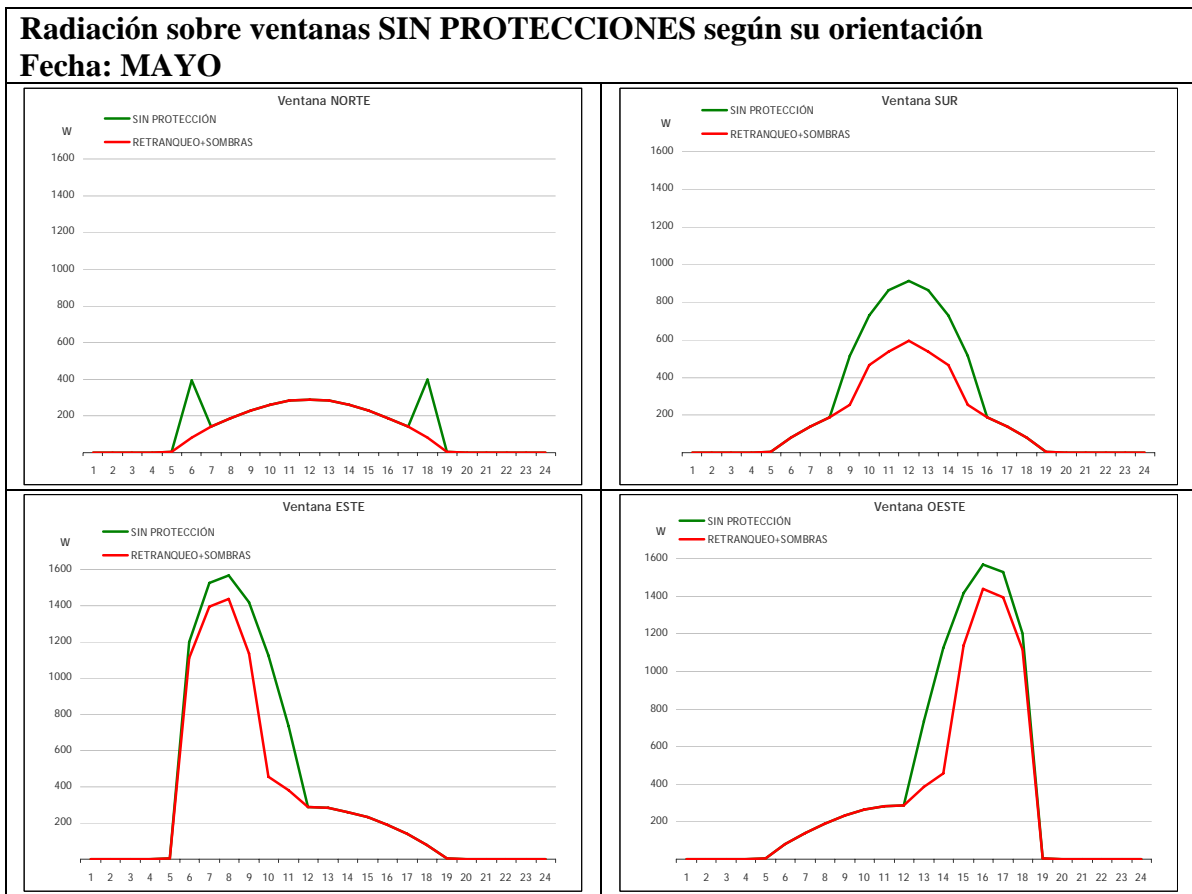
Los resultados de radiación obtenidos en ambos programas se representan de manera gráfica en las siguientes tablas para distintas situaciones y distintos meses de cálculo. En este primer grupo de gráficas se representan los valores obtenidos en un día representativo del mes de mayo. En el caso del VPCLIMA el día que toma como referencia es el 21 de este mes, mientras que para el caso del DesignBuilder se ha tomado el día 15 de mayo.

Las primeras cuatro gráficas que se muestran corresponden al edificio descrito en el punto anterior teniendo en cuenta que no posee ningún tipo de alero de protección. Cada una de las gráficas representa la radiación sobre cada una de las ventanas del mismo, orientadas según los cuatro ejes cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste.



**Gráfica 16: Radiación sobre la ventana a lo largo de un día característico de mayo.**

En este primer grupo de gráficas se aprecia el efecto que tienen las sombras del propio edificio sobre la cantidad de radiación que llega al mismo. En el caso de la ventana con orientación Norte se observa que la cantidad de radiación que llega corresponde básicamente a la cantidad de radiación difusa, es decir no llega componente directa. En una situación en la que existe una superficie orientada al Norte sin ningún tipo de protección, en el mes de mayo existe una cantidad de radiación directa en las primeras y últimas horas del día, en donde la trayectoria solar tiene un ángulo azimutal mayor de  $90^\circ$  y menor de  $-90^\circ$ . En el siguiente grupo de gráficas se muestra una comparativa de los datos anteriores del programa VPCLIMA con los cálculos de radiación que llega a una ventana igual que la anterior sin considerar la protección que supone el retranqueo de la misma y las sombras del edificio.

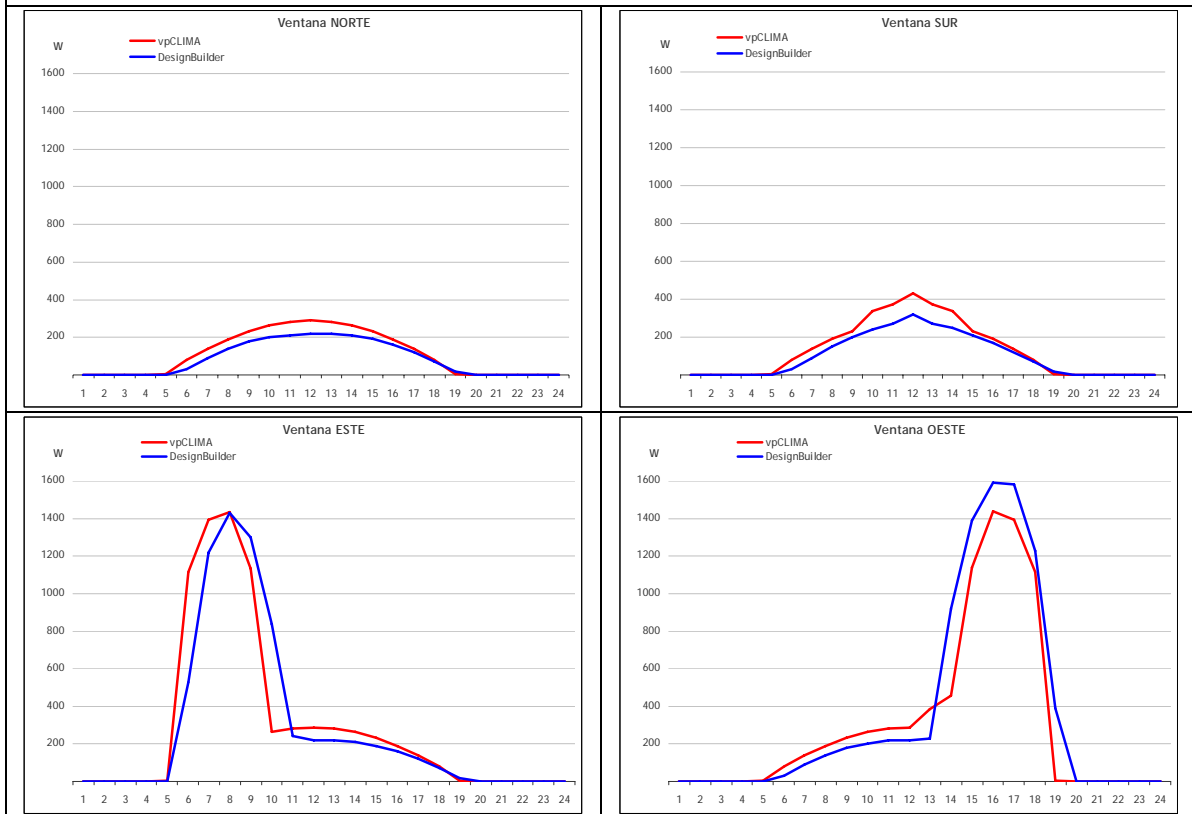


**Gráfica 17: Radiación sobre una ventana sin protecciones y con protecciones a lo largo de un día característico de mayo.**

A continuación se muestran los valores del cálculo obtenidos en la escena en la que el edificio se protege con un alero en la parte superior de 0,5 metros de longitud. En el gráfico perteneciente a la ventana orientada en dirección Sur se aprecia una considerable disminución de la radiación. Los dos programas tienen un comportamiento similar. Al igual que en el caso anterior, se observa que el programa VPCLIMA obtiene unos valores ligeramente superiores al DesignBuilder, cuya diferencia se justifica debido a la diferencia en los modelos de radiación utilizados por ambos. Por lo que respecta al comportamiento de los valores, puede considerarse que los cálculos de la fracción soleada de las ventanas es muy similar en ambos casos.

### Edificio con un alero de sombra de 0,5m.

Fecha: MAYO

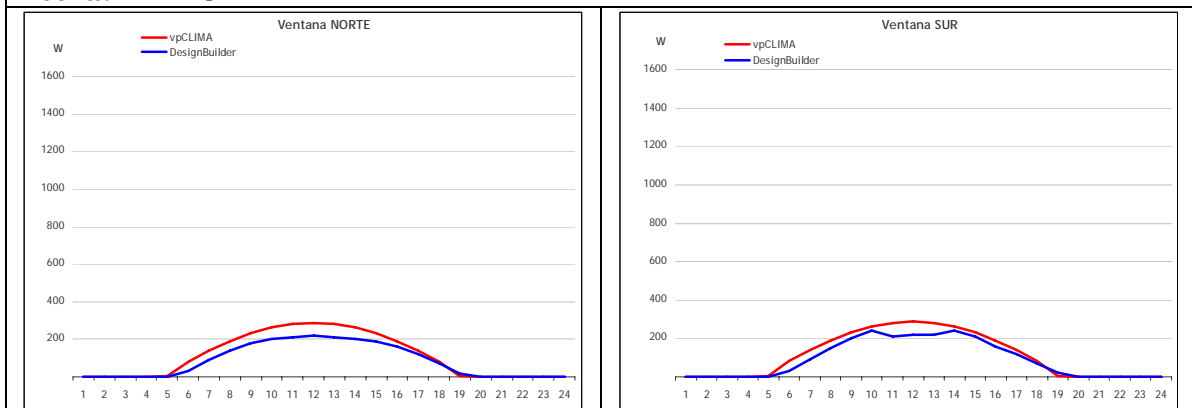


Gráfica 18: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 0,5m. a lo largo de un día característico de mayo.

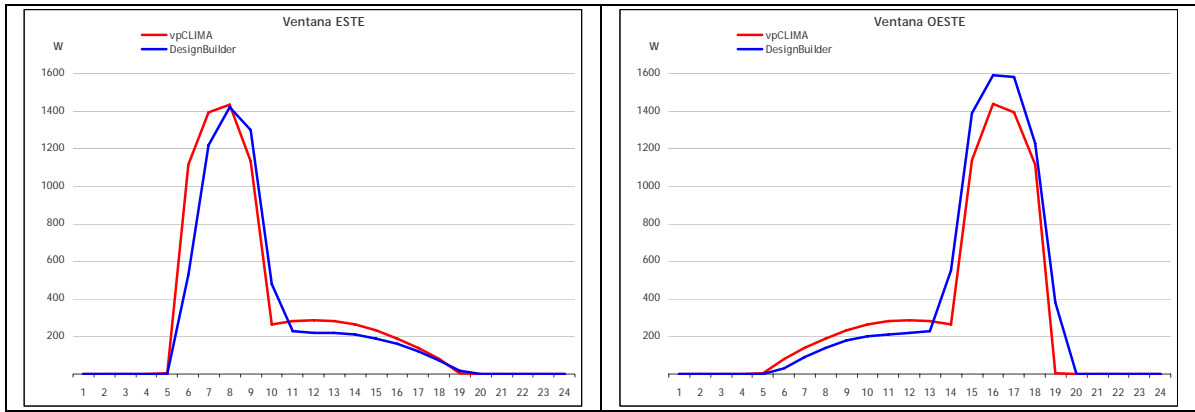
A continuación se muestran los valores obtenidos en las siguientes escenas en las que se modifica la longitud del alero de sombra, con 0,75m. y 1m. de longitud.

### Edificio con un alero de sombra de 0,75m.

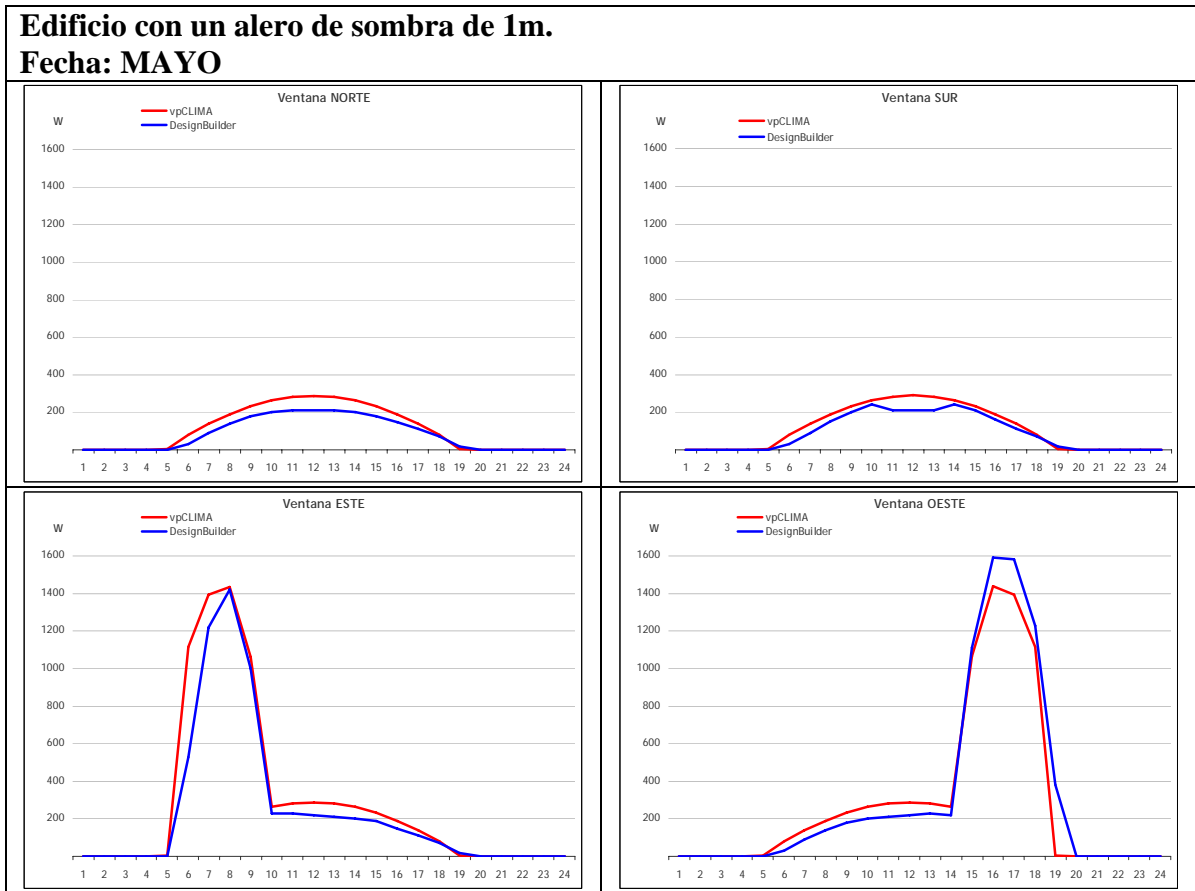
Fecha: MAYO







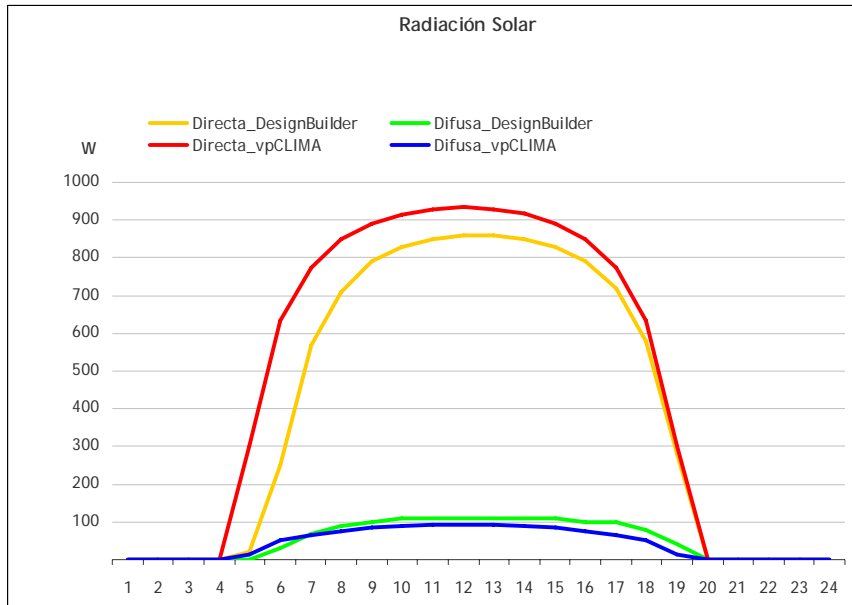
**Gráfica 19: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 0,75m. a lo largo de un día característico de mayo.**



**Gráfica 20: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 1 m. a lo largo de un día característico de mayo.**

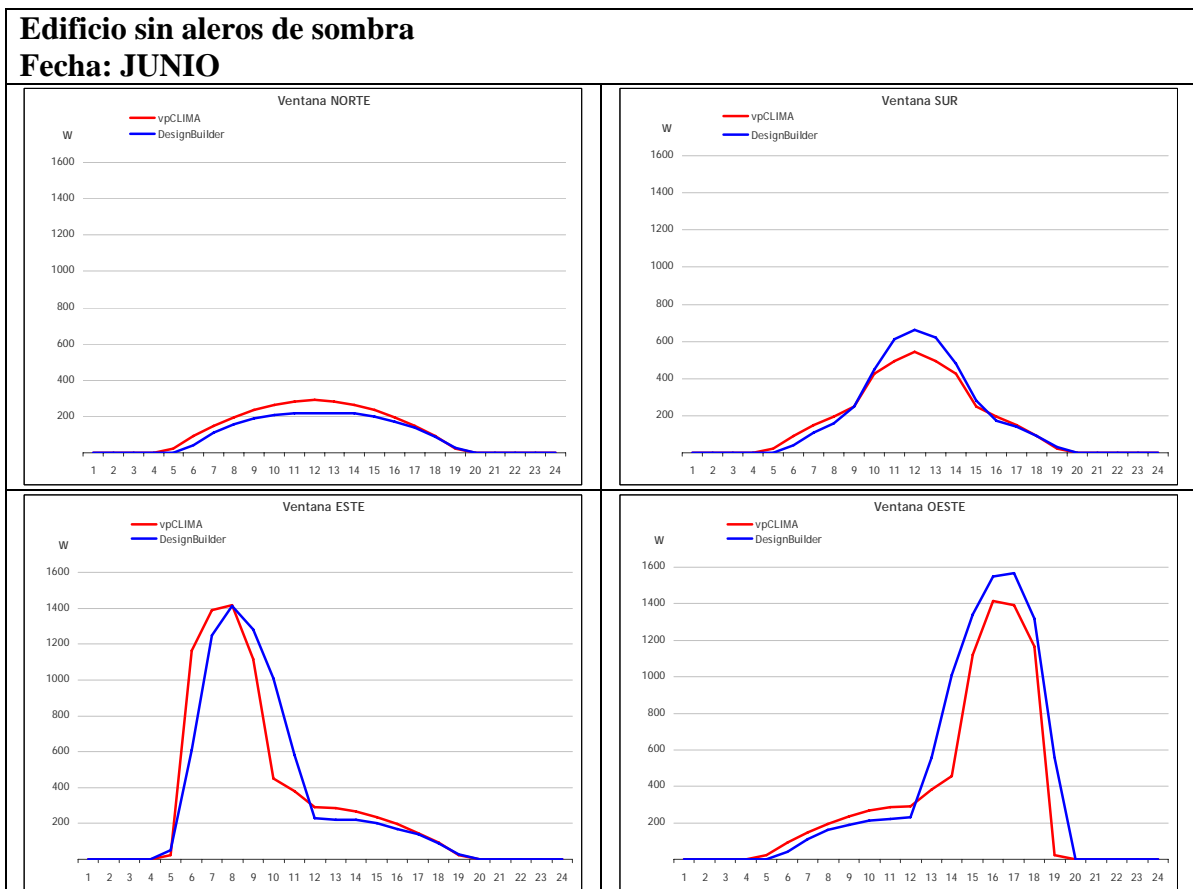
En ambos casos el comportamiento de los programas se encuentra suficientemente ajustado, por lo que se puede considerar que los resultados obtenidos en los cálculos de sombras del edificio utilizando el nuevo método son razonables y se ajustan a los valores que se obtienen en aplicaciones similares.

A continuación se muestran los valores obtenidos para los meses de junio y julio, los cuales suelen emplearse con más frecuencia para hacer el cálculo de cargas de los edificios. En primer lugar se muestra la gráfica de radiación para poder determinar la diferencia existente entre ambos modelos de radiación.



**Gráfica 21: Radiación solar directa normal y difusa en vpCLIMA y DesignBuilder para el mes de junio.**

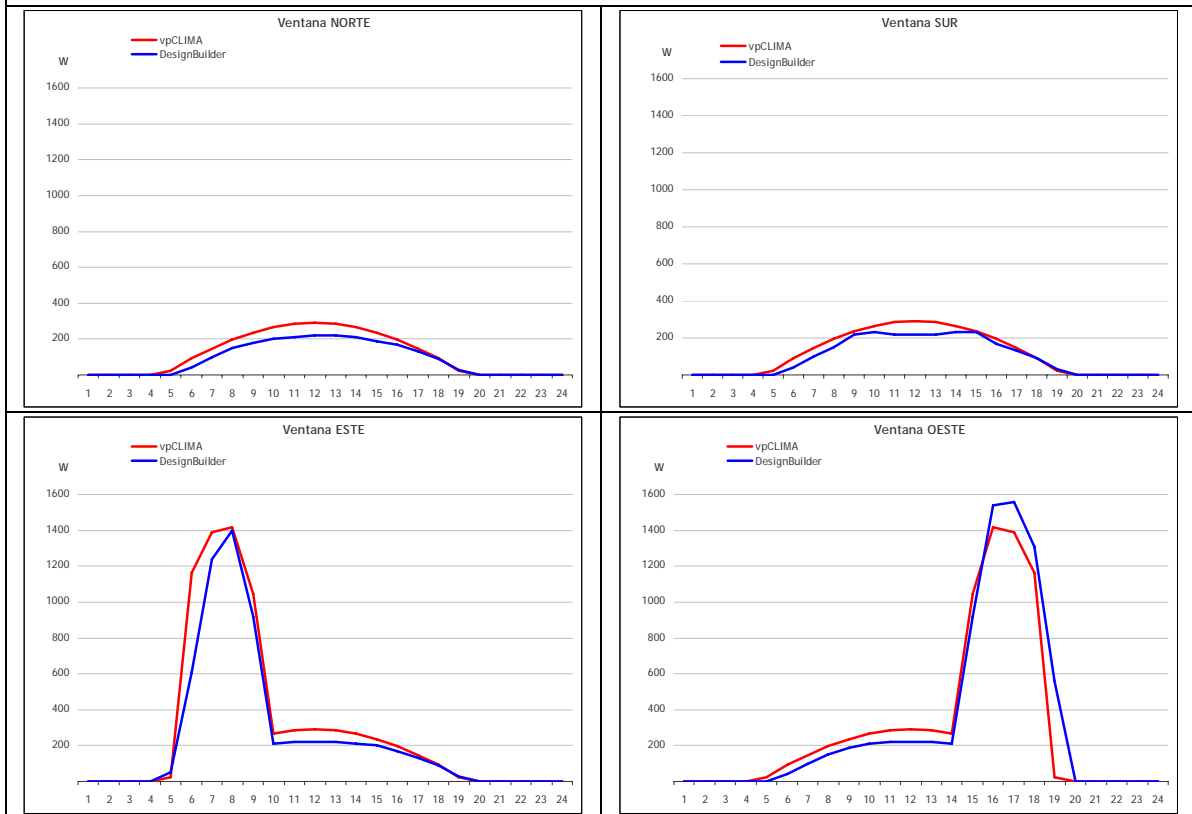
Se especifican a continuación los valores de radiación obtenidos para el mes de junio en el mismo edificio que antes para las escenas en que no existe alero y en que se coloca el alero de 1 metro de longitud.



**Gráfica 22: Radiación sobre la ventana sin alero a lo largo de un día característico de junio.**

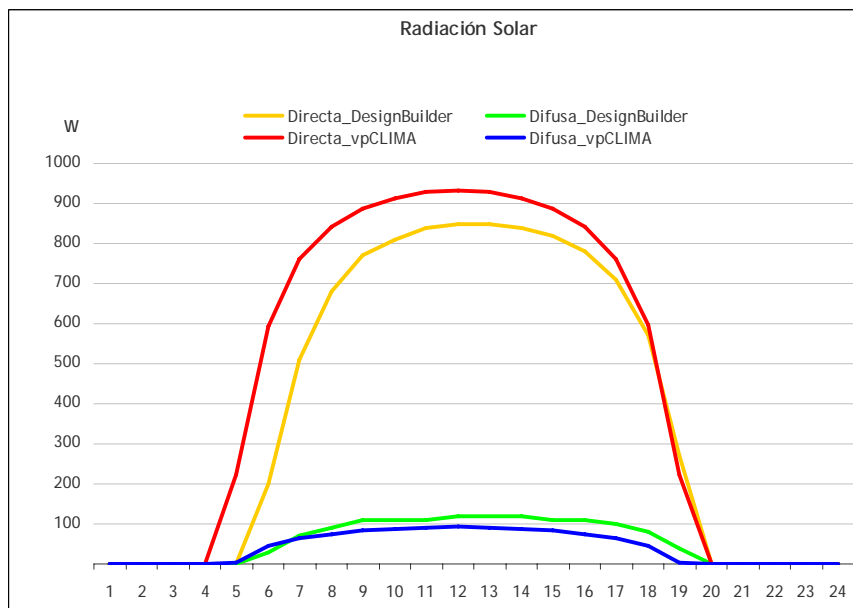
## Edificio con un alero de sombra de 1m.

Fecha: JUNIO



**Gráfica 23: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 1 m. a lo largo de un día característico de junio.**

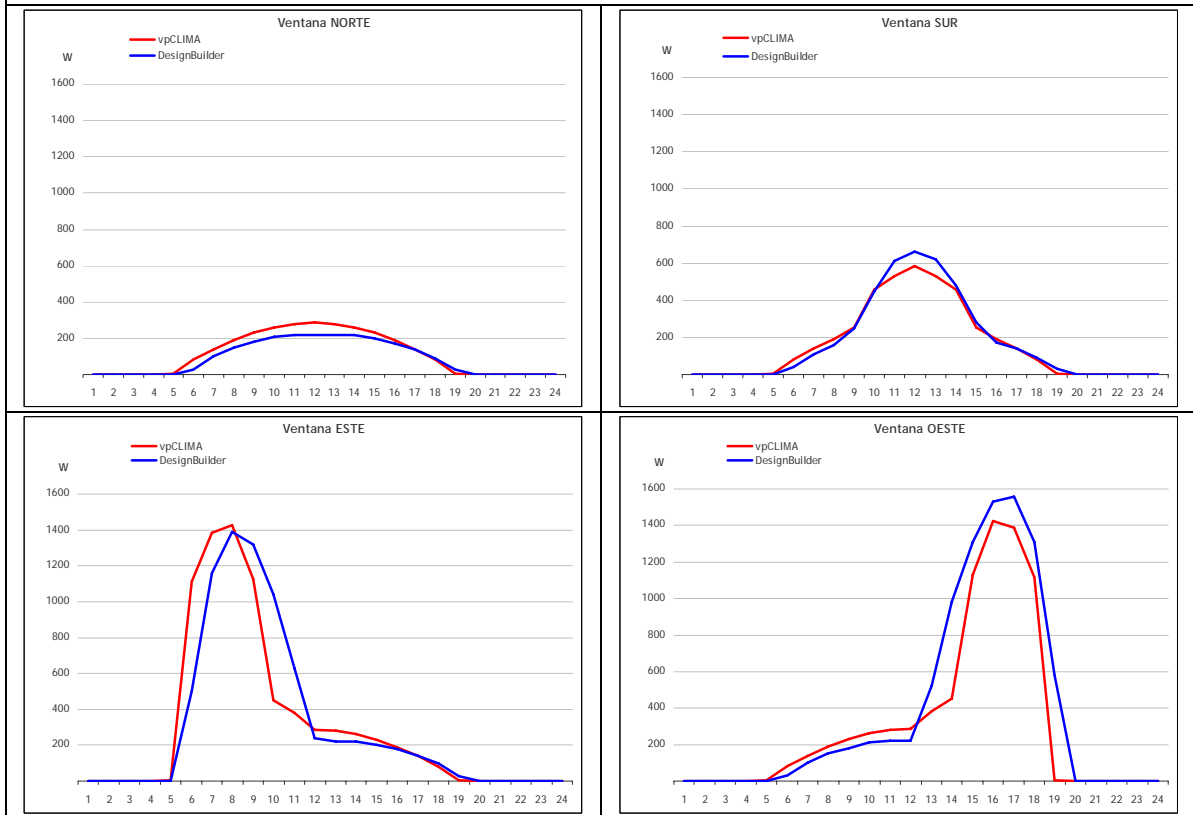
El comportamiento de la radiación es muy similar al caso anterior ya que tanto la trayectoria como la radiación solar son es muy similar en los meses de mayo, junio y julio. Seguidamente se muestra el comportamiento de las mismas escenas en el caso del mes de julio.



**Gráfica 24: Radiación solar directa normal y difusa en vpCLIMA y DesignBuilder para el mes de julio.**

### Edificio sin aleros de sombra

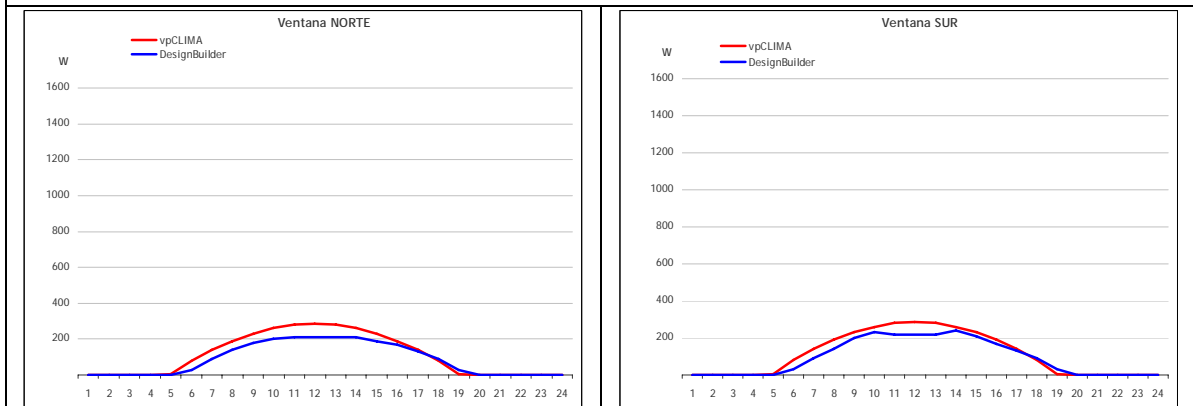
Fecha: JULIO

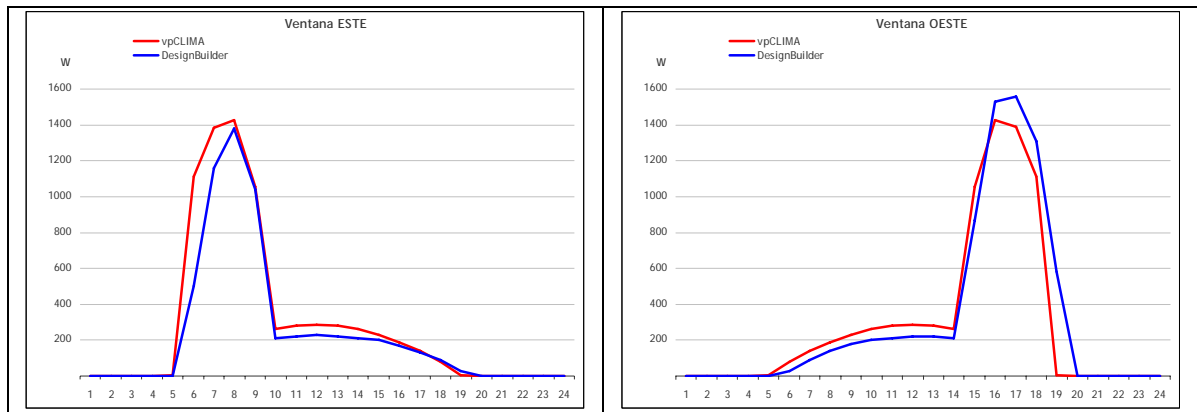


Gráfica 25: Radiación sobre la ventana a lo largo de un día característico de julio.

### Edificio con un alero de sombra de 1 m.

Fecha: JUNIO





**Gráfica 26: Radiación sobre la ventana con alero de protección de 1 m. a lo largo de un día característico de julio.**

Con estos resultados se puede considerar que los resultados obtenidos con el nuevo método se ajustan a los que se obtienen en otras aplicaciones y que la utilización del algoritmo de Shadow Volumes puede aportar más agilidad al cálculo de la fracción soleada de cada elemento exterior del edificio.

### 9.3. VISTAS DEL PROGRAMA

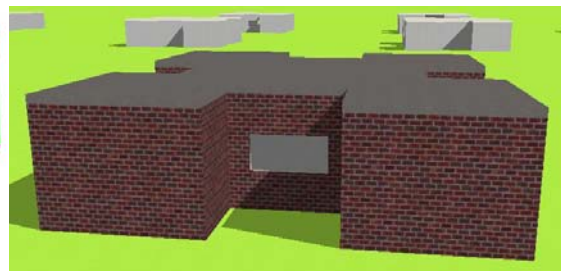
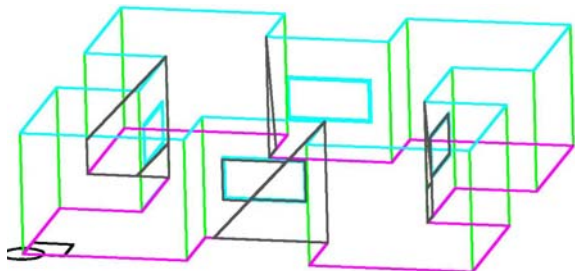
A continuación se muestran las figuras, obtenidas en ambas aplicaciones como resultado del cálculo de sombras para distintas escenas. Las estructuras representadas de manera alámbrica pertenecen a los resultados del cálculo de sombras del programa vpCLIMA visualizados en AutoCAD. Las imágenes renderizadas pertenecen al cálculo efectuado en el programa DesignBuilder para visualización de sombras.

En primer lugar se representa la geometría obtenida para el cálculo de sombras en el mes de mayo (el día 15 de este mes como día representativo) para distintas horas del día.

#### Escena: Ventana sin protección superior

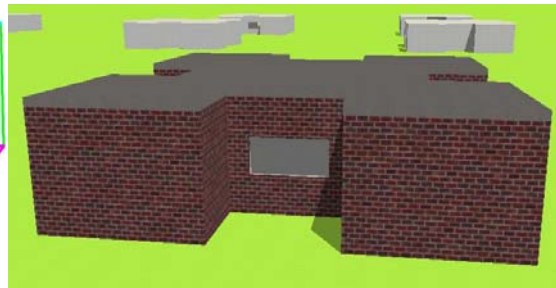
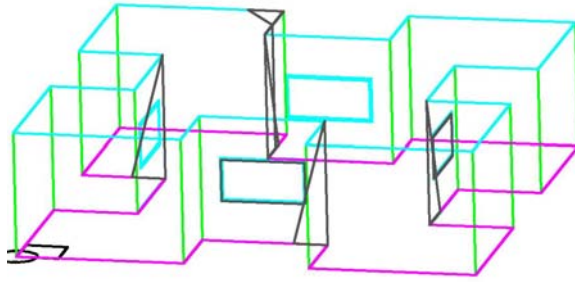
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO

Hora: 9h.



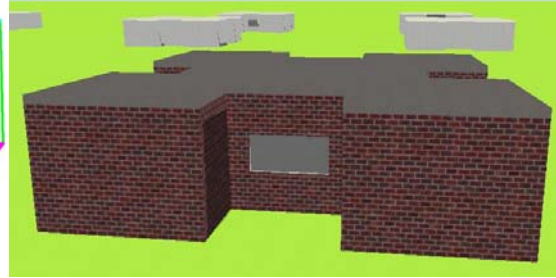
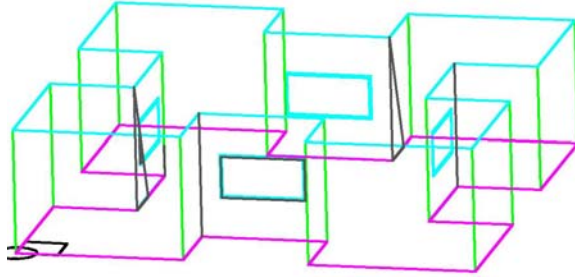
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO

Hora: 11h.



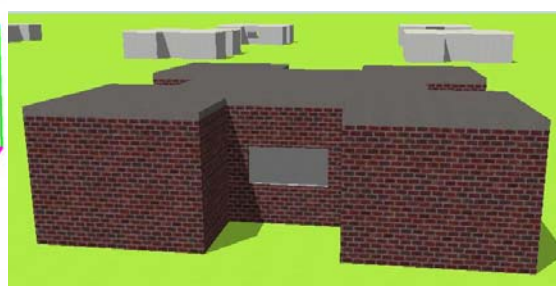
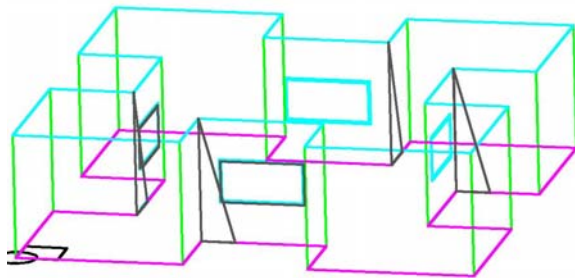
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO

Hora: 12h.



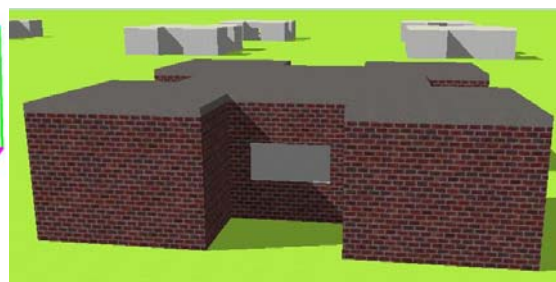
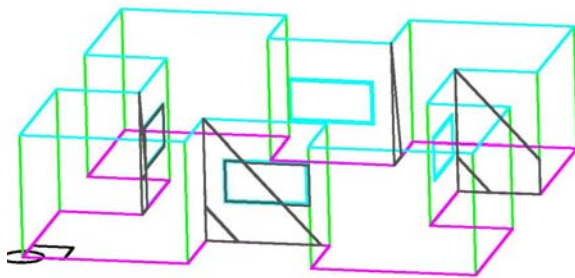
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO

Hora: 13h.



Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO

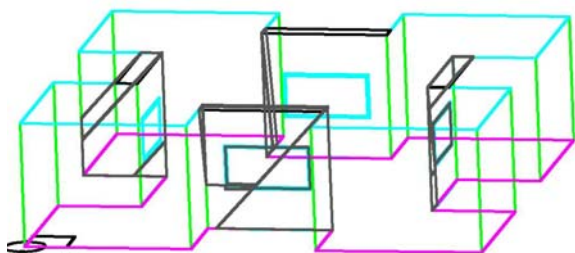
Hora: 15h.



**Escena: Ventana con protección superior, alero de 0.5 metros**

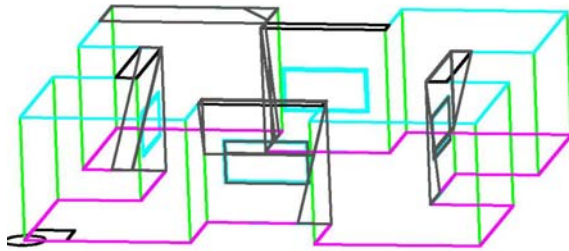
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO

Hora: 9h.

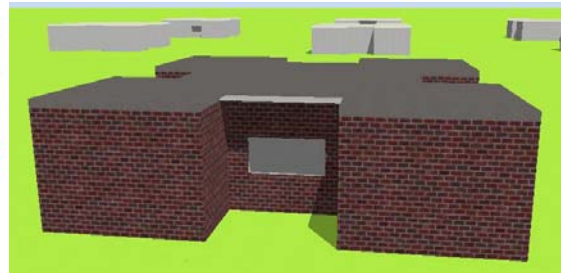




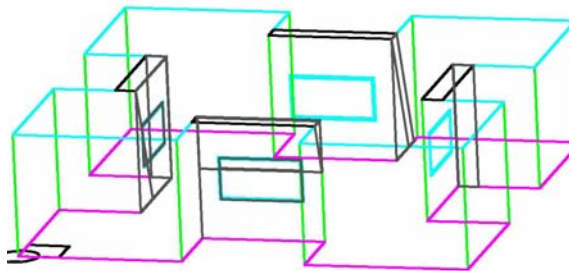
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO



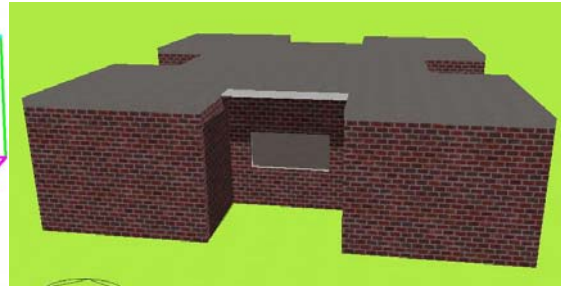
Hora: 11h.



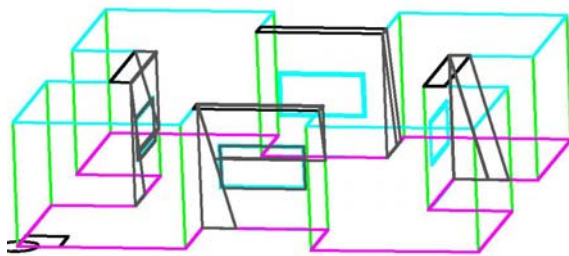
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO



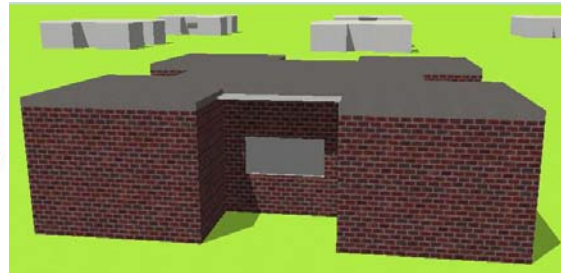
Hora: 12h.



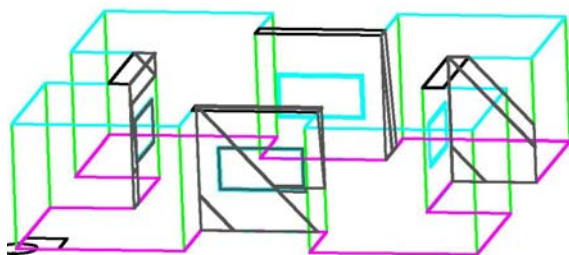
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO



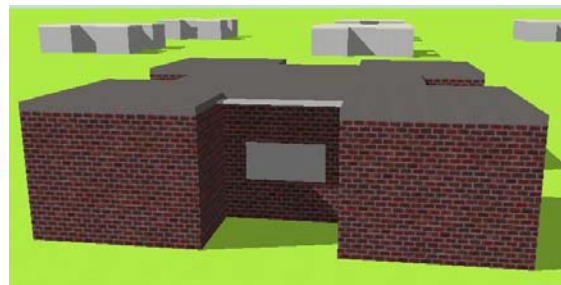
Hora: 13h.



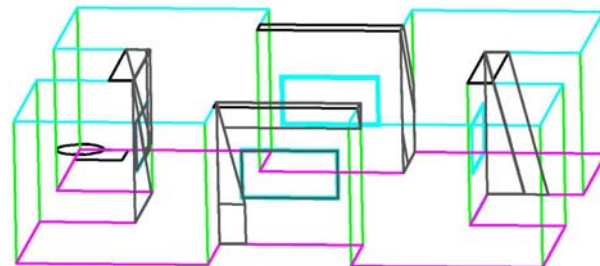
Orientación: SUR Fecha: 15 de MAYO



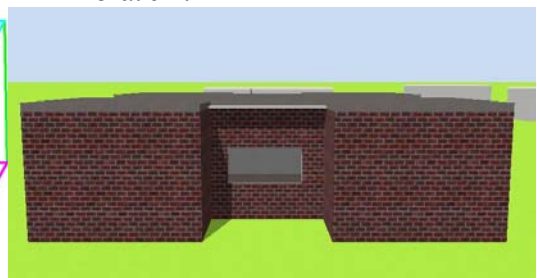
Hora: 15h.



Orientación: ESTE Fecha: 15 de MAYO

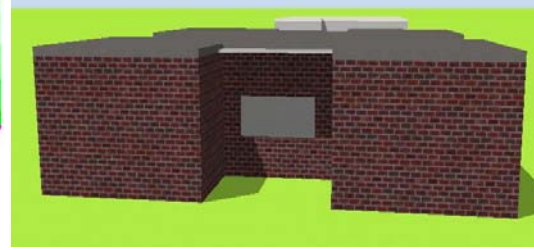
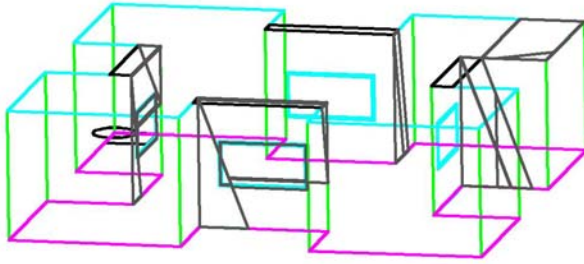


Hora: 9h.



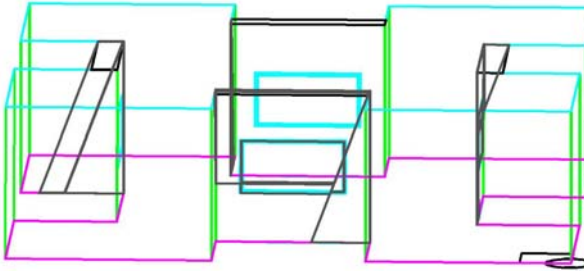
Orientación: ESTE Fecha: 15 de MAYO

Hora: 11h.



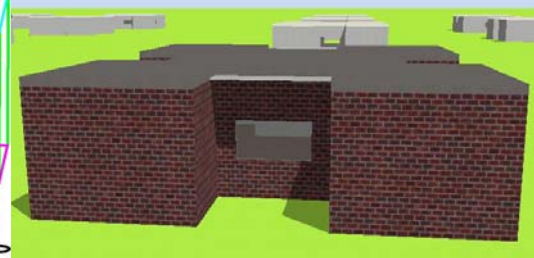
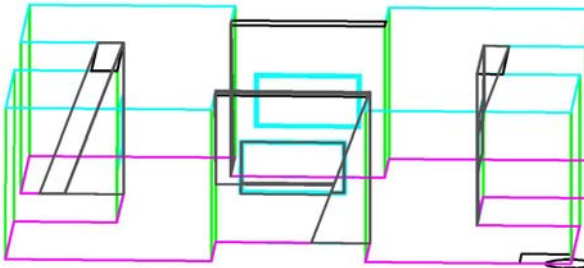
Orientación: OESTE Fecha: 15 de MAYO

Hora: 13h.



Orientación: ESTE Fecha: 15 de MAYO

Hora: 15h.

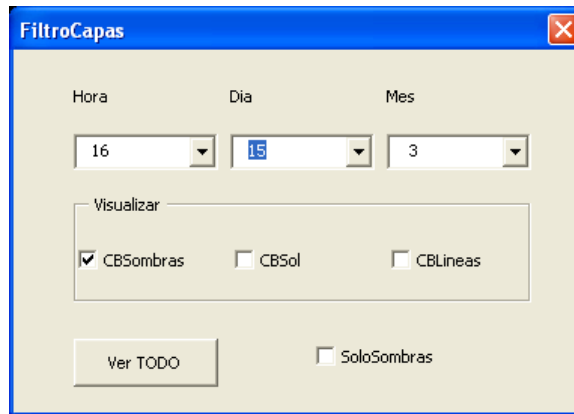


**Figura 148: Representación de los polígonos de sombra obtenidos en el vpCLIMA y la imagen renderizada del programa DesignBuilder.**

Estos resultados mostrados en la figura anterior muestran que los polígonos que resultan de la aplicación del método Shadow Volumes son idénticos a los que se obtienen en el programa de renderizado de la aplicación DesignBuilder. En el caso de la aplicación sobre AutoCAD, el resultado es una estructura alámbrica más difícil de interpretar a simple vista que la figura que se obtiene del renderizado de DesignBuilder, pero aún así es posible apreciar que la forma de los polígonos de sombra del método Shadow Volumes, representados de color negro en las figuras de la izquierda, corresponden exactamente a la zona de sombras representada en el programa de renderizado en la parte derecha de la figura. Los resultados son satisfactorios para todas las orientaciones y para las distintas horas del día.

Con la finalidad de poder visualizar de manera cómoda solamente los polígonos que representan la sombra en un determinado momento del año se ha creado la siguiente aplicación en AutoCAD que actúa como filtro de polígonos de sombra. Para visualizar los polígonos correspondientes a un determinado momento del año hay que seleccionar: la hora, el día y el mes. El programa internamente filtra aquellos polígonos de sombra que corresponden a ese instante y los muestra, ocultando los otros. El aspecto que tiene la forma que lo lleva a cabo es el que se muestra en la siguiente figura.





**Figura 149: Filtro creado en la macro de AutoCAD para visualizar solamente las sombras del periodo seleccionado.**

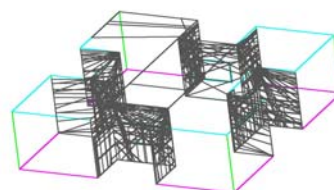
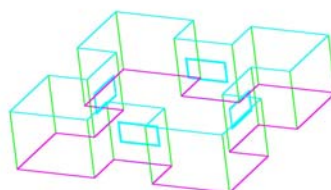
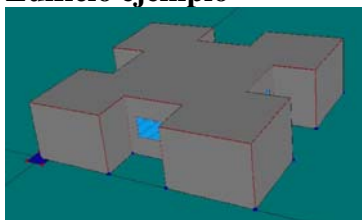
## 9.4. TIEMPOS DE CÁLCULO

El tiempo empleado en realizar el cálculo de sombras en una escena depende de distintos factores, los más influyentes son el número de polígonos y la complejidad de la estructura que forman.

Resulta imposible estimar con exactitud el tiempo que emplean los programas de simulación en realizar los cálculos solares, ya que este proceso es parte del proceso que ejecutan al realizar la simulación completa del edificio, aunque algunos programas como el EnergyPlus (en DesignBuilder como “interface”) indican en un texto en la ventana del proceso de cálculo la situación en la que están. Se aprecia de esta forma de manera cualitativa una velocidad de cálculo muy superior en el caso del método Shadow Volumes.

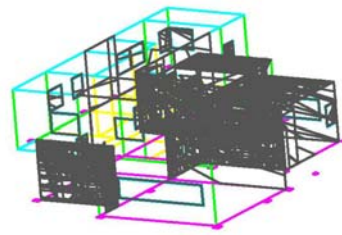
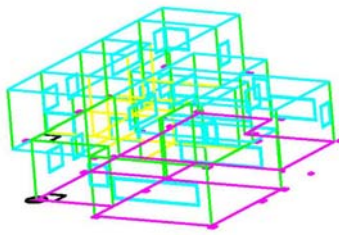
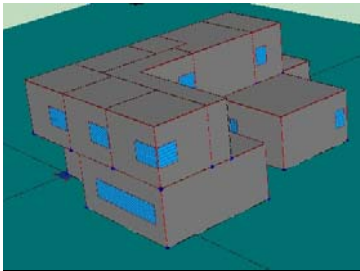
A continuación se presenta una tabla en la que se exponen los tiempos de cálculo empleados por el método Shadow Volumes para el cálculo de una escena con un determinado número de polígonos.

### Edificio ejemplo



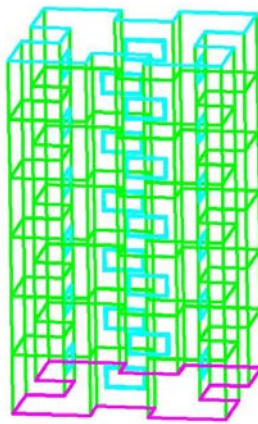
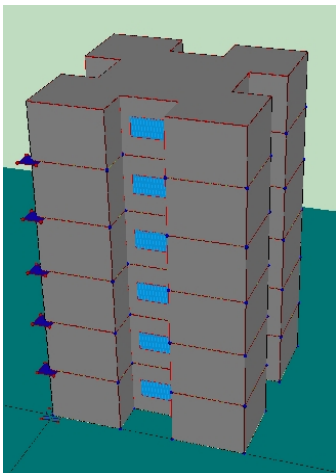
Nº polígonos escena	Nº escenas cálculo	Nº polígonos sombra generados	Tiempo (segundos)
25	45	879	0,47

### Vivienda Unifamiliar



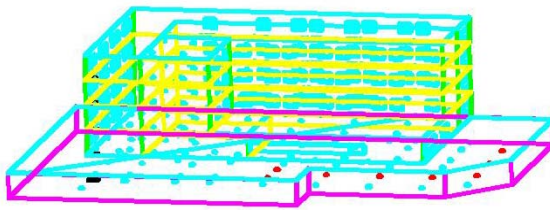
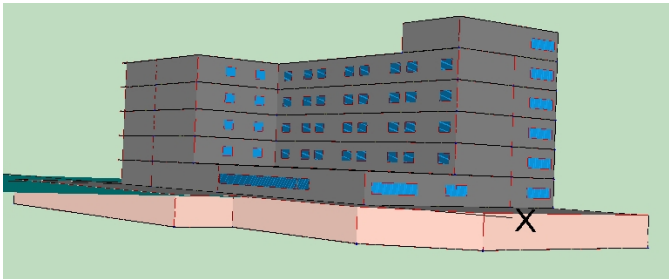
Nº polígonos escena	Nº escenas cálculo	Nº polígonos sombra generados	Tiempo (segundos)
65	45	2716	1,61

### Edificio de oficinas



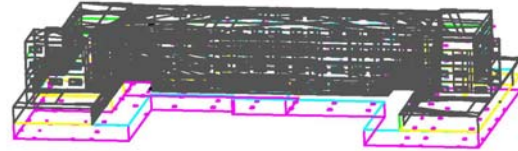
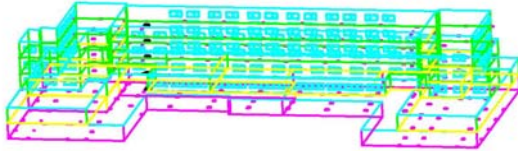
Nº polígonos escena	Nº escenas cálculo	Nº polígonos sombra generados	Tiempo (segundos)
145	45	5972	4,45

### Hotel



Nº polígonos escena	Nº escenas cálculo	Nº polígonos sombra generados	Tiempo (segundos)
140	45	4278	13,89

## Hotel



Nº polígonos escena	Nº escenas cálculo	Nº polígonos sombra generados	Tiempo (segundos)
432	45	20188	125,36

### 9.5. ANÁLISIS DE LOS RETRANQUEOS DE LOS HUECOS

Para analizar el problema del cálculo de radiación sobre los huecos, una primera aproximación es el cálculo que se ha realizado en la primera fase y que se ha descrito anteriormente, en el que se calcula el efecto de las sombras sobre la superficie de fachada, tanto para los cerramientos como para los huecos de los mismos. Para ello se definía el polígono de ventana como un polígono añadido sobre la superficie del cerramiento exterior, de manera que éste nunca proyectara sombra sobre la ventana.

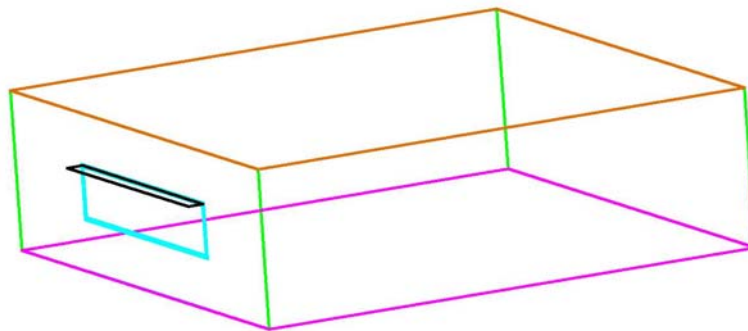
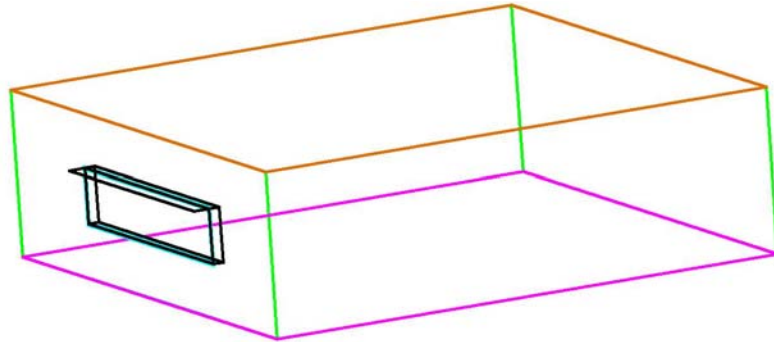


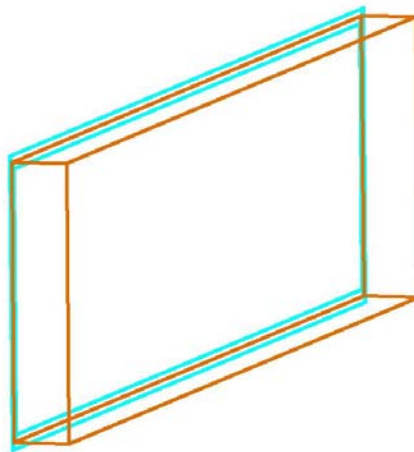
Figura 150: colocación del polígono de ventana sobre el polígono de superficie.

Otro efecto que se debe considerar a la hora de calcular la radiación sobre el hueco es la existencia o no de retranqueos en el mismo. En la mayoría de edificios los vidrios de las ventanas se sitúan en la superficie interior del muro, con lo que el espesor del muro actúa como retranqueo sobre la misma, aportando mayor protección a la misma.



**Figura 151: Escena con retranqueo en la ventana.**

En la segunda fase de cálculos se genera una escena más compleja, en la que se crean más polígonos para poder representar la estructura del retranqueo. Para cada hueco en el que se desea estudiar el efecto de los retranqueos se crean un grupo de cinco polígonos. Cuatro de ellos representan los laterales de la ventana: las dos jambas verticales, una a la izquierda y otra a la derecha, el dintel y el alfeizar. El quinto polígono representa la superficie interior del hueco, donde se coloca el vidrio. Sobre este polígono se calcularán los nuevos polígonos de proyección de sombras.



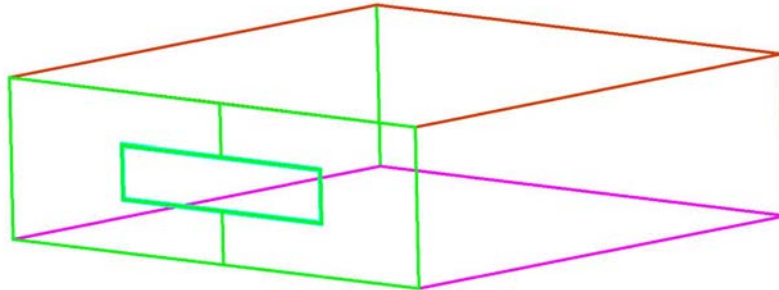
**Figura 152: Elementos que forman el retranqueo, con las normales de los polígonos apuntando hacia fuera para el cálculo correcto.**

### **9.5.1. LA NUEVA ESCENA DE CÁLCULO**

Como se ha comentado anteriormente, para poder añadir a la escena el efecto del retranqueo sobre la ventana es necesario definir una escena de mayor complejidad que la anterior. Para la resolución de este problema se pueden plantear distintas soluciones, a continuación se detallan las características de cada una y la que finalmente se adopta en el programa VPCLIMA. Cada una de las soluciones propuestas necesita incorporar nuevos polígonos a la escena, al menos los cinco descritos anteriormente son inevitables, ya que definen el problema.

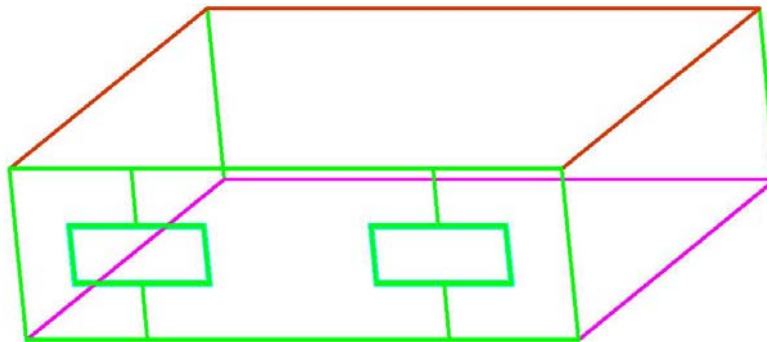
La primera de las opciones es la construcción de una escena que represente el edificio y en la que se representen las ventanas y puertas exteriores en los cerramientos

como polígonos que contengan huecos. En AutoCAD no se permite generar entidades como polilíneas con agujeros interiores, por lo que es necesario definir de alguna manera los huecos. Una solución es la división del cerramiento exterior que contiene el hueco en dos polilíneas, de manera que los vértices de las mismas definen el hueco interior que contiene el cerramiento.



**Figura 153: Cerramiento exterior dividido en dos para poder representar el hueco.**

La división del cerramiento en el ejemplo anterior no resulta excesivamente compleja ya que solamente posee una ventana. Pero el problema aumenta de complejidad a medida que existen más huecos en el muro ya que se deben realizar tantas divisiones como huecos existan en el mismo.



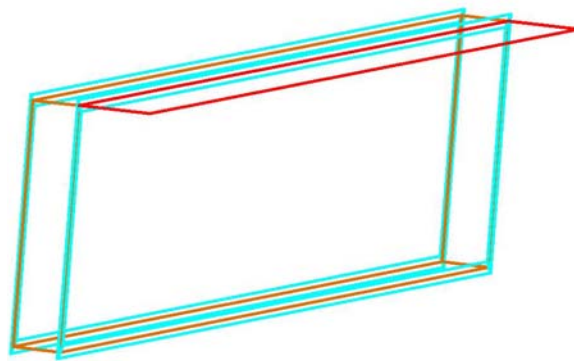
**Figura 154: División múltiple del cerramiento exterior por los huecos.**

Características de este proceso:

- Este procedimiento requiere aumentar el número de polígonos en la escena y redefinir cada cerramiento en un mayor número de polígonos, ya que es necesario un número de polígonos igual al número de ventanas más uno.
- Esta opción ralentiza el cálculo de sombras ya que la escena es mucho más compleja, y aunque los polígonos son coplanares y no formarán más nodos en el árbol SVBSP, es necesario filtrar cada uno de ellos en la escena.
- Además esta opción requiere más tiempo para definir las coordenadas de cada polígono de los que forma el cerramiento.
- Existe el problema añadido de que en este caso, un cerramiento viene definido por múltiples elementos gráficos, y según la estructura de información que se ha descrito en el capítulo 6 para almacenar e interrelacionar la geometría con las propiedades térmicas de los elementos esto representaría un hándicap.

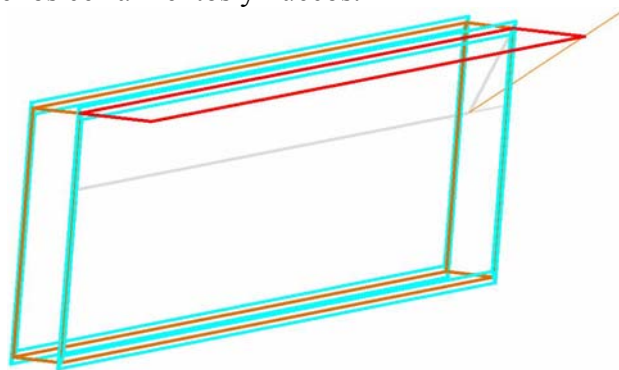
Otro modo de abordar el problema es utilizando los resultados de la primera aproximación al problema, es decir, los cálculos de sombra sobre la superficie de fachada de los huecos. El procedimiento requiere de dos cálculos de sombras, el primero consiste en el cálculo sobre las superficies exteriores que conforman la fachada, para posteriormente analizar cada hueco en función de los polígonos de sombra que tenga asociados junto con las nuevas polilíneas que forman el retranqueo. En este segundo paso, los polígonos de sombra y los de retranqueo se proyectan sobre la superficie interior que representa el vidrio, obteniendo de esta manera las proyecciones de sombra sobre el mismo.

- El primer paso consiste en definir la escena para la ventana, con sus elementos de retranqueo.



**Figura 155: polígonos que conforman la escena para el cálculo sobre el hueco.**

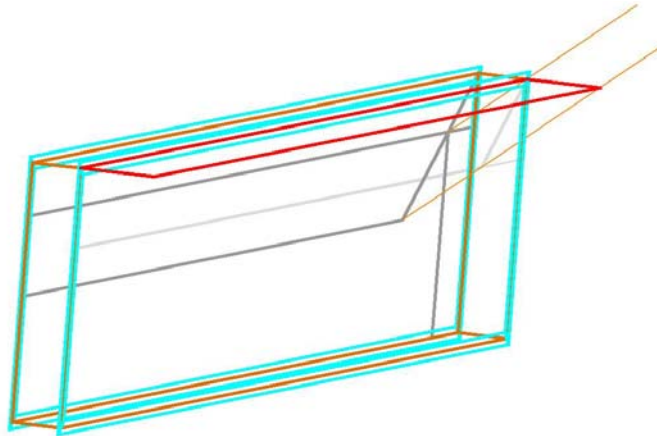
- A continuación se genera la primera fase del cálculo de sombras, en el que se calculan las proyecciones de sombra de la escena sobre los planos de fachada exteriores de los cerramientos y huecos.



**Figura 156: proyección de las sombras sobre la superficie exterior del edificio.**

- Finalmente, para el cálculo del efecto del retranqueo se estudia la escena anterior formada por el polígono que representa el alfeizar, las dos jambas y el dintel, junto con la superficie de fondo del hueco que representa el vidrio. A estos polígonos se les suma el polígono de sombras sobre la superficie exterior en un determinado momento, para obtener el resultado final, que son las proyecciones sobre el interior de los mismos.





**Figura 157: proyección de las sombras sobre la superficie interior del hueco.**

Aunque el proceso requiere la definición de muchas escenas distintas, ya que para cada posición del sol hay que definir una escena por ventana, el cálculo es instantáneo debido a la simplicidad de las mismas. El número de polígonos en la escena es muy reducido y por tanto el árbol SVBSP para representarla es muy simple.

### **9.5.2. EFECTO DEL RETRANQUEO EN LOS HUECOS**

El efecto del retranqueo sobre la reducción en la cantidad de radiación directa que llega a la superficie del vidrio es función de distintos parámetros del hueco, por ejemplo, el efecto del mismo es más acusado en unas orientaciones que en otras. Los parámetros más influyentes son:

- La orientación del hueco.
- Las dimensiones del hueco.
- La hora del día.
- El día del año.
- La profundidad del retranqueo.

A continuación se muestra en la siguiente tabla el efecto que tiene un retranqueo de 20 cm. sobre distintos huecos orientados cada uno según los puntos cardinales. En las gráficas se representa el valor de la fracción soleada de la ventana, es decir, el porcentaje de área sobre la que incide la radiación directa del sol. Los datos corresponden a una ventana con las mismas dimensiones situada en diferentes orientaciones. Los gráficos se representan en tres dimensiones para poder mostrar los valores de cada hora y cada mes.

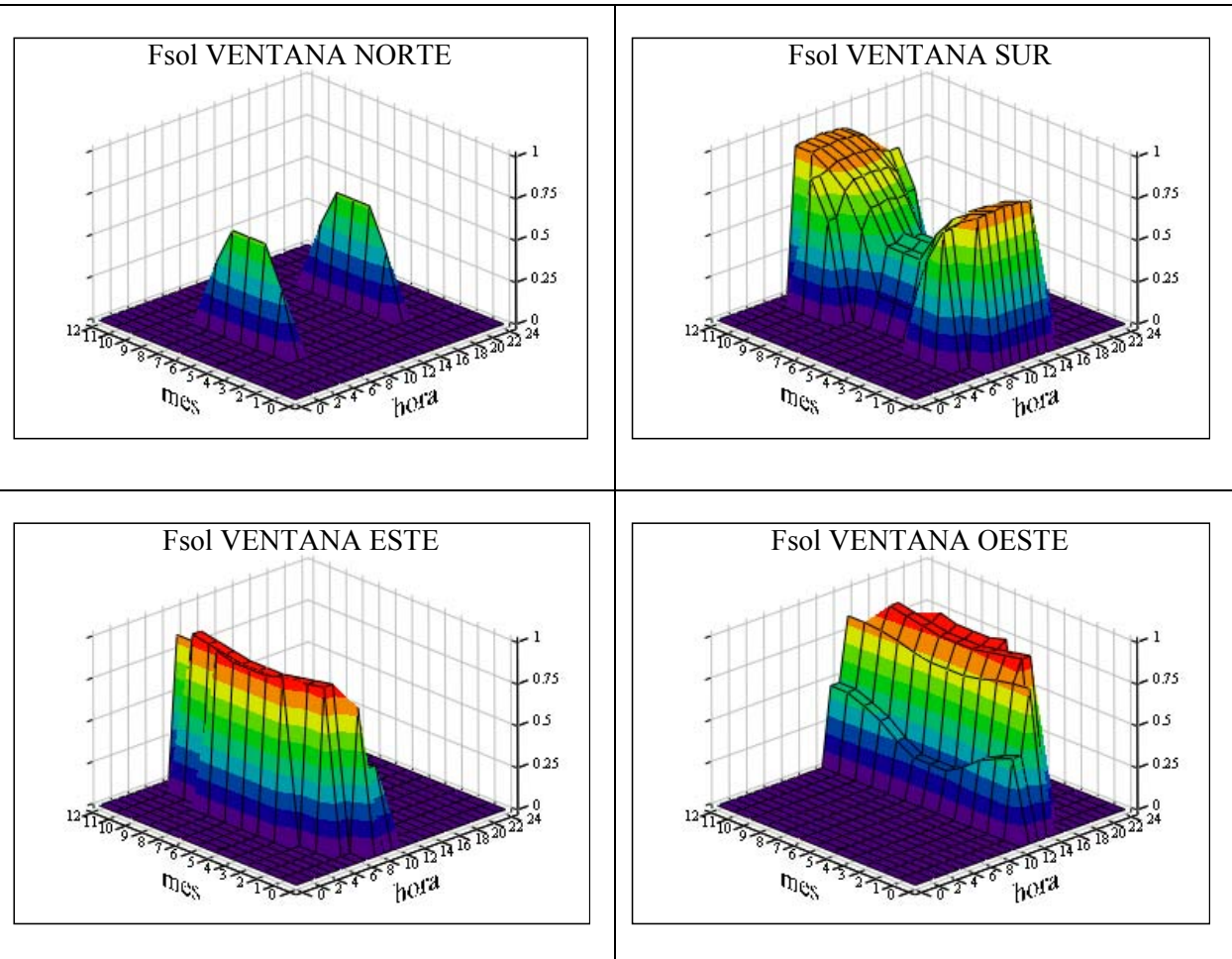
LATITUD: 40° NORTE

DIMENSIONES VENTANA:

ALTURA: 1 m.

LONGITUD: 3 m.

RETRANQUEO: 20 cm.



**Figura 158: Representación de la variación de la fracción solar debido al efecto de un retranqueo de 20 cm. en la ventana.**

Los distintos resultados obtenidos en cada caso muestran el efecto que produce el mismo retranqueo para un hueco orientado de manera distinta. En el caso de la ventana situada en la dirección norte se aprecia un efecto acusado del retranqueo, obviamente, aunque el sol incide en esta orientación sólo en los meses veraniegos, cuando lo hace es en las primeras y últimas horas del día y con un ángulo pequeño respecto a la superficie de la pared, con lo que la proyección de las jambas sobre la superficie interior del hueco resulta bastante extensa.

Por lo que respecta a la ventana con la orientación sur podemos observar en el gráfico que la fracción solar del hueco aumenta en el periodo invernal, mientras que en mayo, junio y julio es inferior. La trayectoria del sol en verano tiene una altura mayor, por lo que para un mismo retranqueo, el dintel de la ventana proyecta mayores sombras en este periodo. En el caso de las ventanas orientadas hacia el Este y hacia el Oeste se observa que tienen un comportamiento simétrico. En el caso de la orientación Este,



durante las primeras horas del día el retranqueo no tiene importancia ya que a estas horas el ángulo de la altura solar es muy pequeño y el ángulo azimutal es prácticamente idéntico al del hueco, con lo que el ángulo de incidencia de los rayos solares es perpendicular al ángulo de la ventana, por lo que no existe proyección del retranqueo sobre la misma. Este fenómeno se mantiene las primeras horas del día, pero a medida que pasa la mañana, el ángulo azimutal cambia y aparecen las proyecciones de las jambas sobre la superficie interior del hueco.

En la tabla siguiente se muestra la simulación realizada a la misma ventana del caso anterior pero ahora aplicando un retranqueo superior, 40 cm. Como puede observarse en los resultados, un retranqueo mayor proporciona mayor protección para la ventana frente a la radiación directa, por lo que los valores de la fracción solar de la misma son inferiores a los mostrados en la tabla anterior.

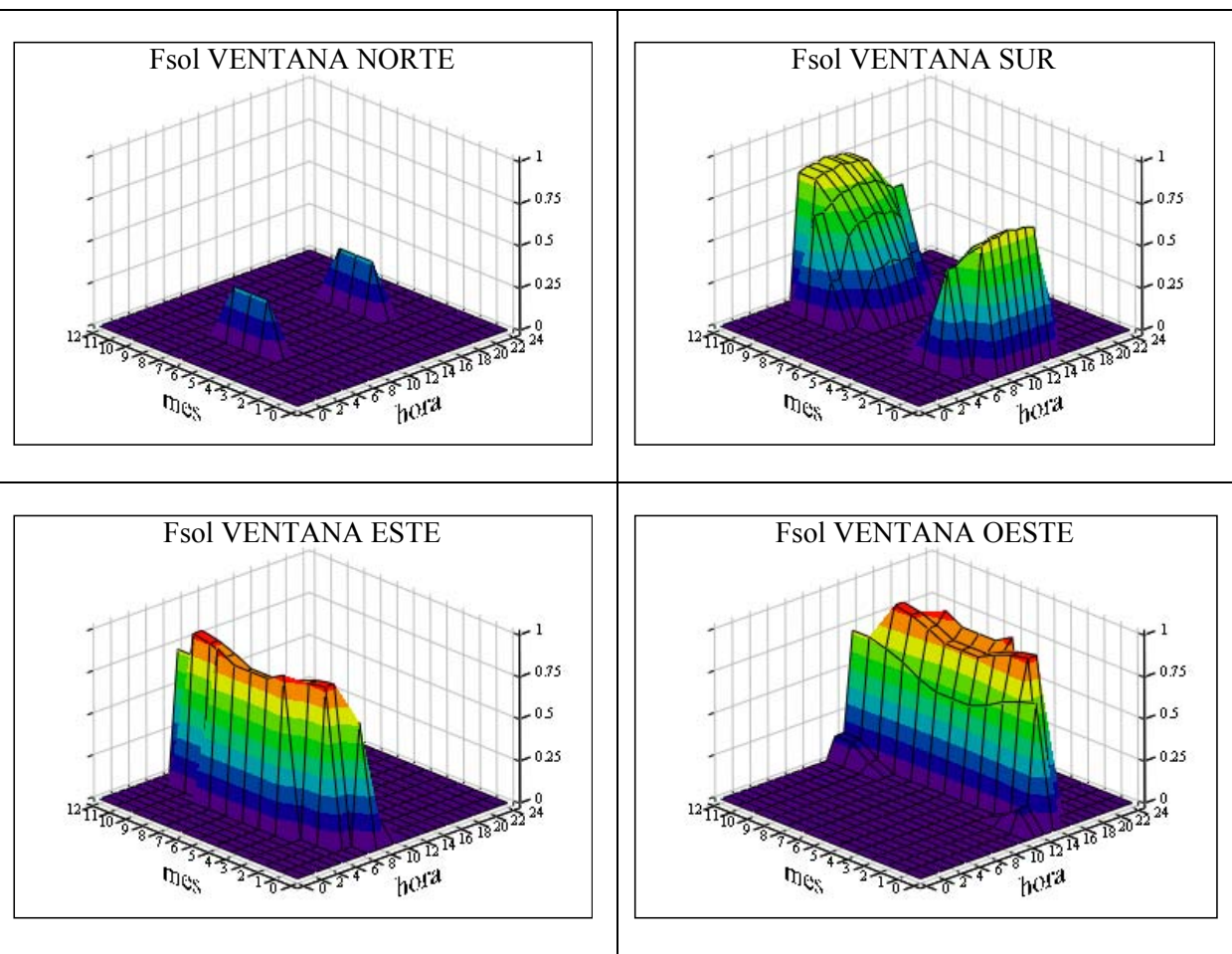
LATITUD: 40° NORTE

DIMENSIONES VENTANA:

ALTURA: 1 m.

LONGITUD: 3 m.

RETRANQUEO: 40 cm.



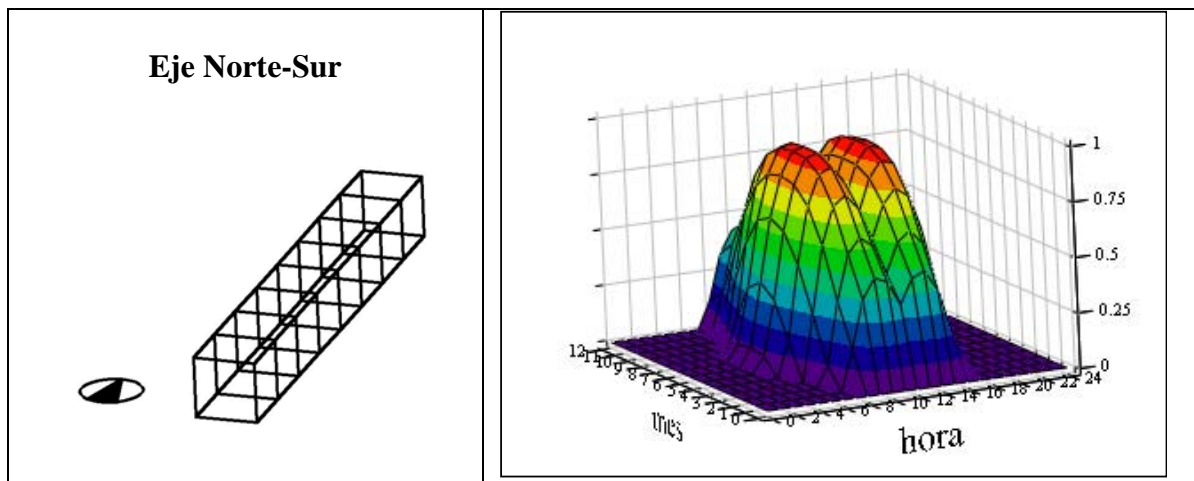
**Figura 159: Representación de la variación de la fracción solar debido al efecto de un retranqueo de 40 cm. en la ventana.**

## 9.6. ANÁLISIS DE LA INSOLACIÓN DE UN EDIFICIO SEGÚN SU CONFIGURACIÓN

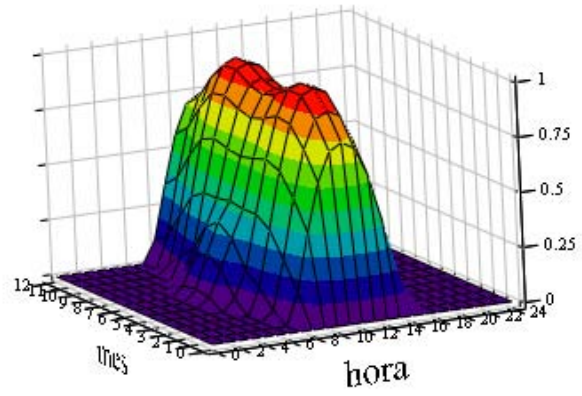
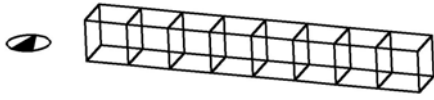
El tener una herramienta capaz de realizar simulaciones de la insolación de un edificio puede resultar interesante para la arquitectura. A continuación se muestra la radiación directa incidente para cada hora de cada día representativo del mes y sobre distintas configuraciones de edificios que encierran un mismo volumen interior. Todos los resultados se han reducido a una escala del 0 al 1 para compararlos mejor. Las gráficas tridimensionales nos permiten representar los valores de radiación para cada hora de cada día del año. En un eje representamos las 24 horas diarias y en el otro los 12 meses.

En la tabla se representan las distintas configuraciones que puede adquirir un edificio con un mismo volumen. Todos los edificios comparados están formados por distintas combinaciones de una misma cantidad de cubos, ocho, y de igual tamaño. El ejemplo consta de tres disposiciones distintas, en las que cambia la compacidad del edificio y que ubicadas de manera distinta se obtienen siete variaciones para estudio.

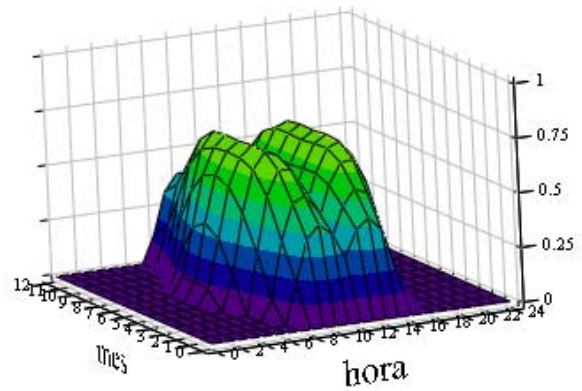
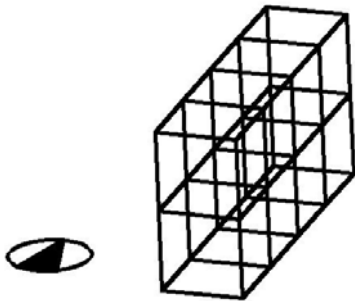
La primera combinación muestra los ocho cubos formando una línea, la cual da pie a tres posibilidades distintas: orientación eje Norte-Sur, orientación eje Este-Oeste, y disposición vertical. La segunda configuración representa un edificio con dos alturas y una anchura mayor, configuración con mayor compacidad que la anterior. Esta disposición se analiza tanto en eje Norte-Sur como en eje Este-Oeste. La tercera configuración es la que mayor compacidad presenta, se trata del cubo, en los resultados se aprecia que ésta también es la que mayor protección ofrece de la radiación directa. Finalmente se ha estudiado una forma de edificio menos simple que las anteriores para observar su comportamiento, se trata de la última figura llamada “Configuración libre”.



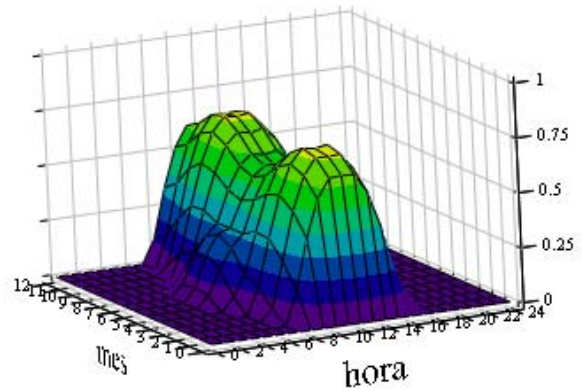
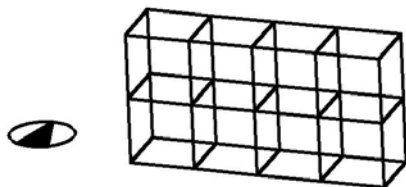
**Eje Este-Oeste**

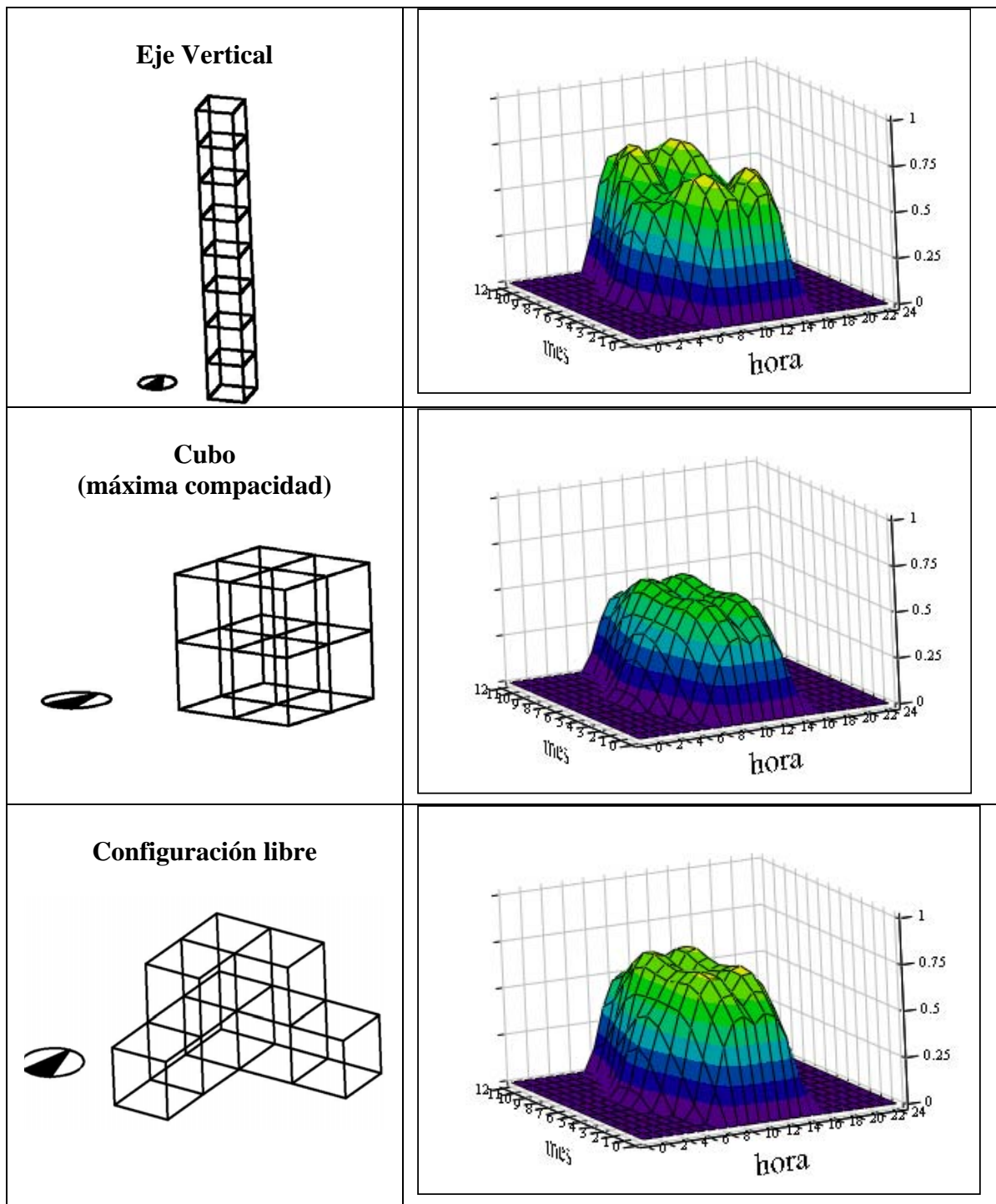


**Eje Norte-Sur con dos alturas**



**Eje Este-Oeste con dos alturas**

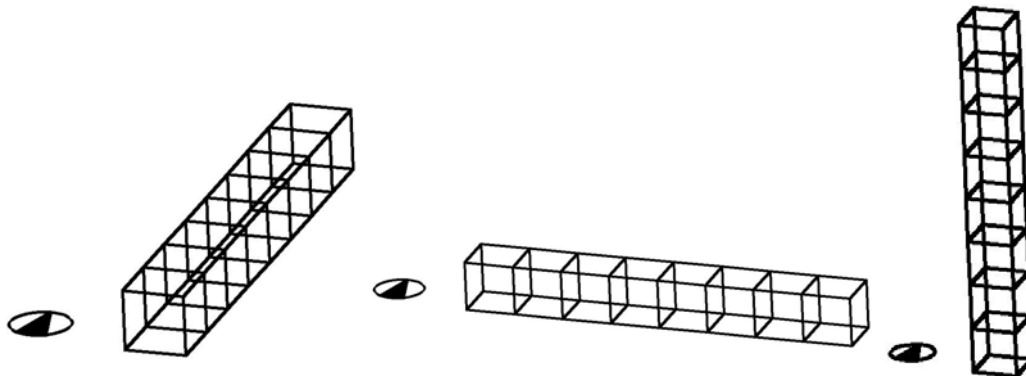




**Tabla 14: Radiación solar directa sobre distintas configuraciones de edificios.**

Con los resultados mostrados en la tabla anterior se puede apreciar el efecto que tienen distintas características del edificio sobre los valores finales de radiación directa. En primer lugar se puede apreciar el importante efecto que tiene la compacidad del edificio en la disminución de radiación que llega al mismo, así como lo determinante que puede ser la orientación que adopte una misma configuración de edificio en los resultados finales.

Es importante reflexionar sobre los resultados que se obtienen para las distintas distribuciones que adopta el edificio. En primer lugar se puede comentar la variación de los resultados obtenidos para la configuración lineal del edificio en función de la orientación y disposición del mismo.



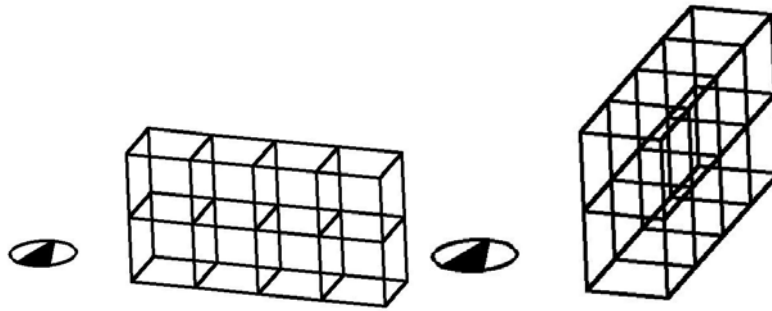
**Figura 160: Posibles orientaciones y disposiciones para la configuración lineal del edificio.**

Los resultados obtenidos en cada uno de los casos son curiosamente muy distintos. El edificio orientado con el eje Norte-Sur presenta mayor exposición por la mañana y por la tarde, ya que sus mayores superficies exteriores se encuentran a esas horas expuestas al sol, además, a esas horas el sol tiene una altura inferior a la del mediodía solar, por lo que el ángulo de incidencia sobre la pared es mayor y mayor por tanto la radiación que esta recibe.

En el caso de la disposición según el eje Este-Oeste, la forma de la gráfica indica una mayor aportación en el mediodía solar para todos los meses del año. En cambio, la cantidad es mayor en los meses de abril y septiembre que en los meses de mayo, junio y julio debido a que la superficie lateral de mayor exposición solar es en este caso la que está orientada hacia el sur, mientras que por la mañana y tarde las superficies laterales expuestas son más pequeñas.

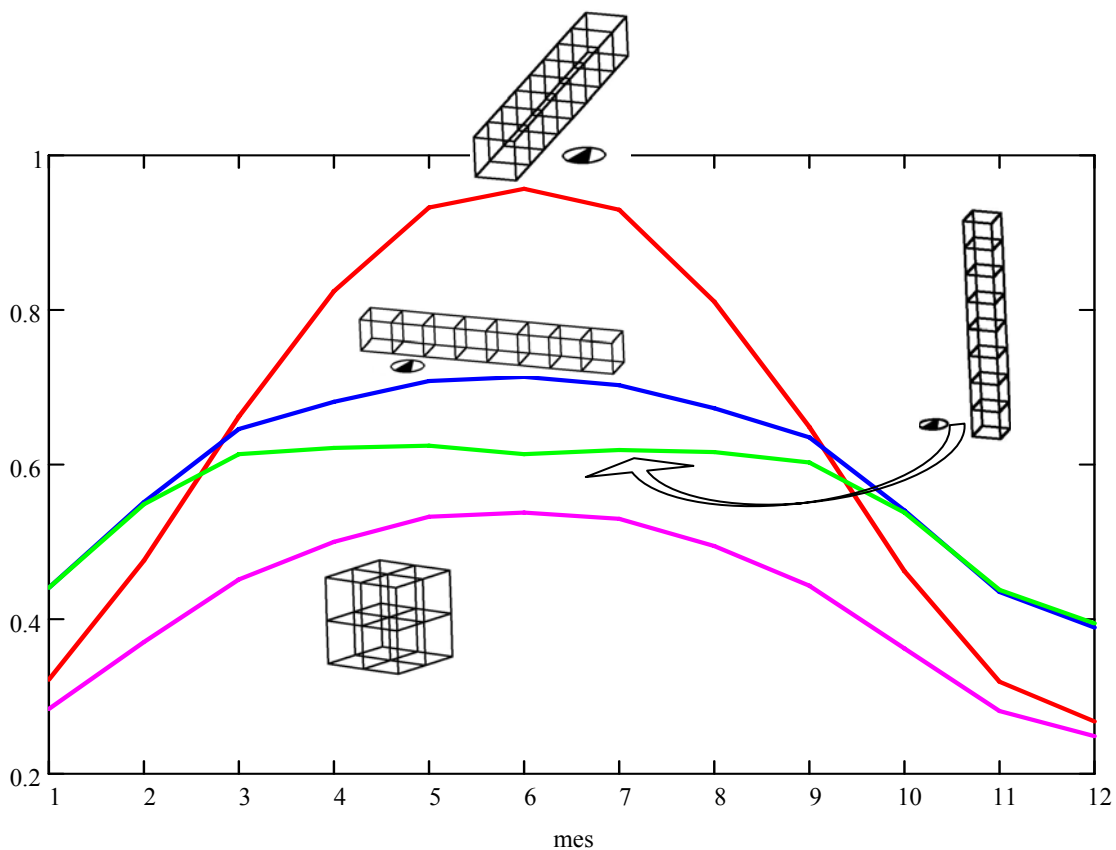
De las tres configuraciones posibles la que recibe menor cantidad de radiación es la que presenta la disposición vertical. A pesar de tener la misma superficie lateral expuesta a la radiación que la suma de las dos anteriores, al este, al oeste y al sur, el factor de mayor influencia es la reducción de superficie horizontal que presenta el edificio. La cantidad de radiación en los meses de verano y en las horas centrales del día es mayor, y es en estos momentos cuando menor es el ángulo de incidencia de la misma sobre superficies horizontales, por tanto cuando más afecta al edificio. En esta última disposición se minimiza la superficie horizontal expuesta, por lo que este efecto se ve de alguna manera menguado.

Por lo que respecta a las configuraciones formadas por dos alturas, su comportamiento se asemeja al que presentan sus homólogas de una altura, pero con cantidades inferiores a éstas. Esta característica se debe a su mayor compacidad, y sobre todo, a la reducción de superficie horizontal que presentan respecto a las lineales, concretamente la mitad. Finalmente el cubo es la forma que presenta la mayor compacidad de todas las posibilidades y también la que menor radiación recibe, como se aprecia en las gráficas.



**Figura 161: Disposiciones estudiadas con doble altura del edificio.**

Otro análisis que se puede realizar con las mismas configuraciones para los edificios consiste en representar los datos de radiación sumandos cada hora a lo largo de un día con lo que se obtienen los valores de irradiación diaria, representativa para cada mes, del edificio. En el caso que se presenta en la siguiente figura se muestran las cuatro configuraciones básicas, las lineales y el cubo:



**Figura 162: Irradiación diaria sobre las distintas configuraciones de edificios.**

En esta gráfica se observa la cantidad total de energía diaria que llega a cada edificio en función de su forma y orientación para cada uno de los meses. Este otro análisis nos permite conocer el comportamiento anual del aporte solar, se aprecia que el edificio lineal orientado en el eje Norte-Sur es el que mayor cantidad de energía recibe en los meses de verano, mientras que en invierno la incidencia es menor respecto a las otras dos configuraciones lineales. El edificio orientado en el eje Norte-Sur es el de mayor fluctuación de radiación anual. Por lo que respecta a las otras dos configuraciones lineales, la que presenta un comportamiento más estable a lo largo de



todo el año es la vertical, ya que, como se ha comentado antes, posee una menor superficie horizontal expuesta al sol. El edificio orientado en el eje Este-Oeste tiene un comportamiento similar en invierno al vertical, mientras que en verano aumenta su exposición respecto de éste, aunque muy por debajo a la que posee en que tiene la orientación opuesta. En este caso también se observa una menor incidencia en la configuración en forma de cubo.

Si volvemos a integrar los datos anteriores mes a mes obtenemos la cantidad total de irradiación directa incidente en el edificio en el periodo anual. Las cantidades para cada configuración se muestran en la siguiente gráfica y su discusión es afín a lo ya mencionado anteriormente.

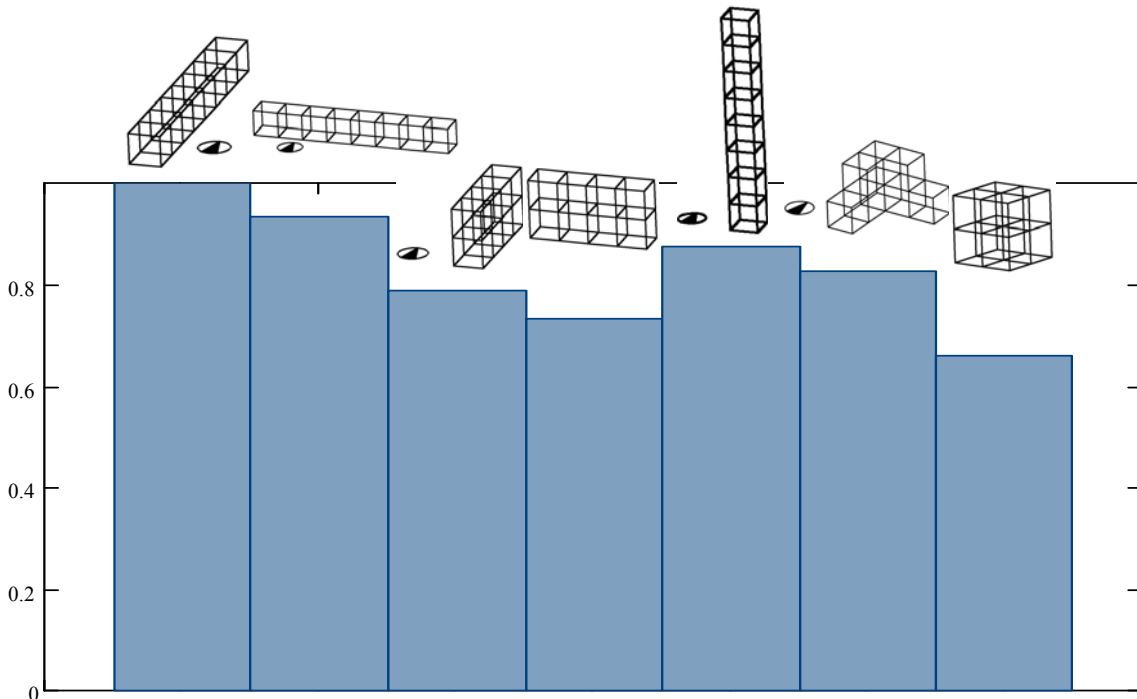


Figura 163: Representación de la irradiación anual sobre cada una de las configuraciones estudiadas.

## 9.7. ÍNDICE DE PROTECCIÓN SOLAR DEL EDIFICIO

El análisis de la radiación incidente sobre los edificios nos incita a pensar en un coeficiente que tenga en cuenta la protección solar global que tiene el edificio en su conjunto frente a la radiación directa del sol, la cual supone uno de los factores determinantes en el cálculo de cargas y la demanda térmica del mismo.

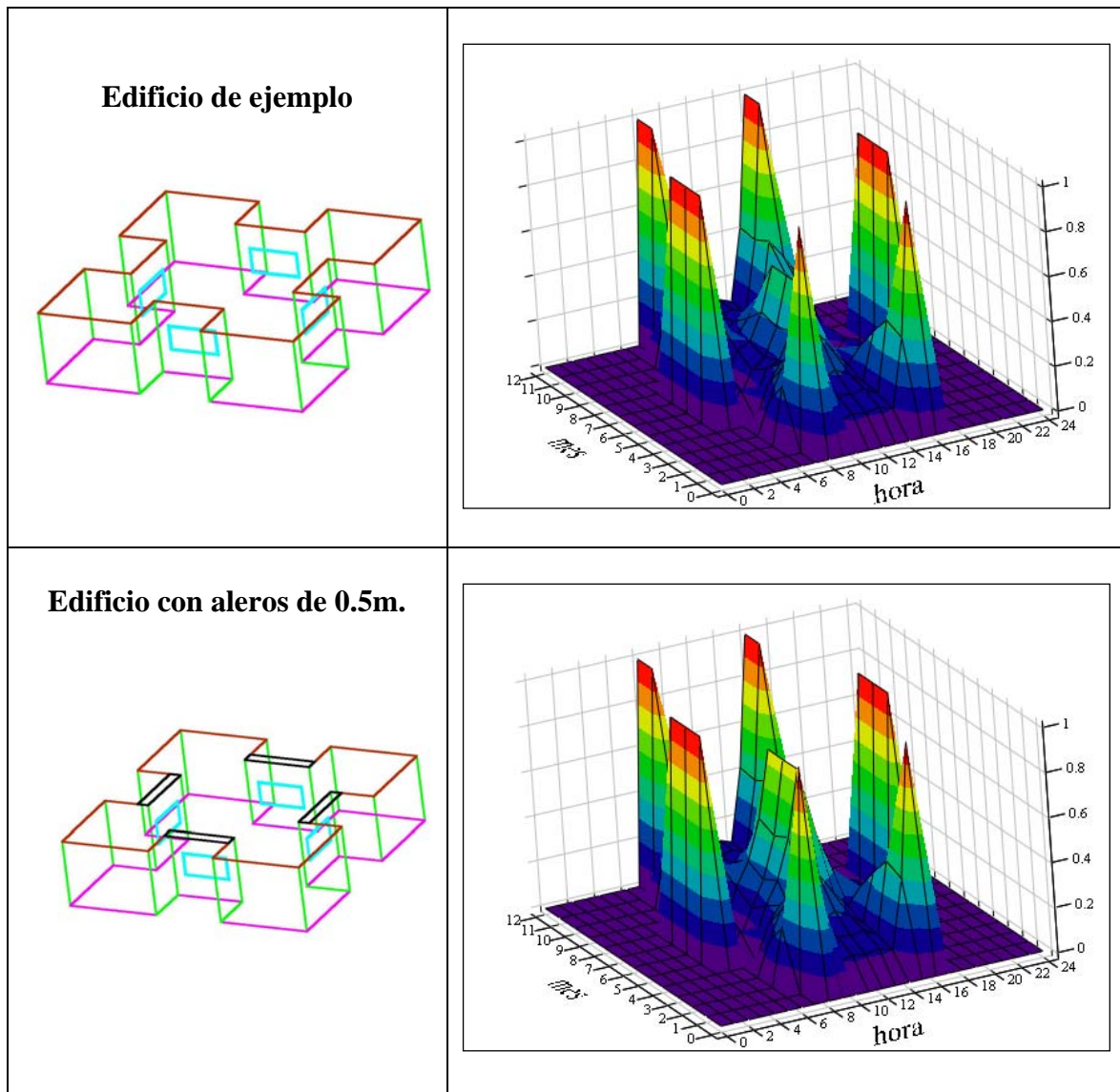
$$IPS = 1 - \frac{\sum_{cerr\_ext} (F_{sol} \cdot Radiación\_directa)}{\sum_{cerr\_ext} Radiación\_directa} = 1 - \frac{\sum_{cerr\_ext} F_{sol} \cdot I_{directa} \cdot A_{cerr\_ext} \cdot \cos \theta}{\sum_{cerr\_ext} I_{directa} \cdot A_{cerr\_ext} \cdot \cos \theta}$$

**Ecuación 78**

Este coeficiente IPS tiene un valor entre cero y uno. El índice representa la protección existente en el edificio de manera global a la radiación solar directa. Su valor muestra, en porcentaje, la cantidad de radiación directa que se consigue evitar que incida en el edificio en un determinado instante respecto a la cantidad que lo haría si no existieran los efectos de las sombras sobre el mismo.

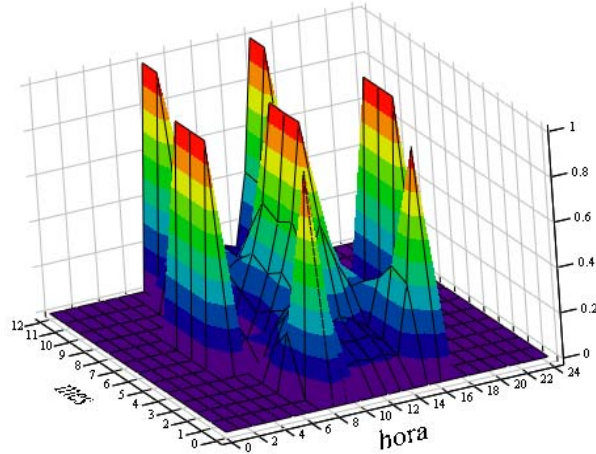
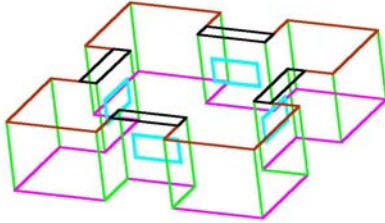
Con este coeficiente se pueden analizar qué configuraciones para un determinado edificio permiten tener mayor protección frente a la radiación y cómo mejorar este efecto. Con este índice se puede analizar el efecto de protección que genera un elemento de sombra colocado en el edificio y saber en qué momentos está actuando con mayor eficacia frente a la radiación solar directa en ese instante.

En el siguiente ejemplo se muestra el valor que toma el índice definido anteriormente y cómo se modifica al añadir elementos de protección sobre un edificio ejemplo.

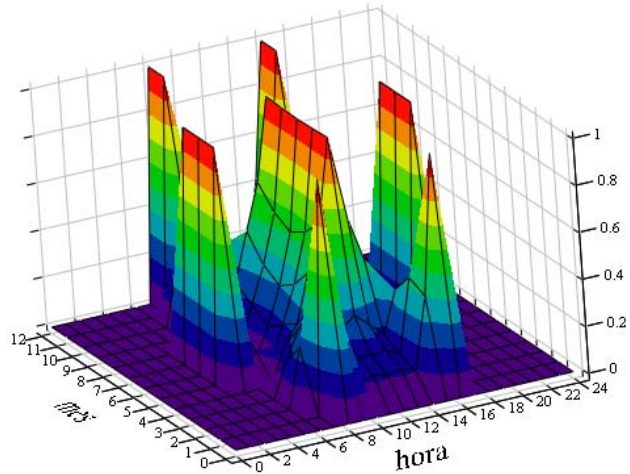
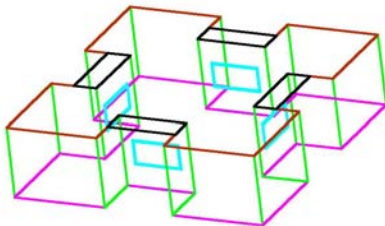




**Edificio con aleros de 0.75m.**



**Edificio con aleros de 1m.**



**Tabla 15: Representación del valor del índice de reducción de la radiación para cada hora del año.**

La primera gráfica indica el nivel de protección que tiene el edificio frente a la radiación directa solar. Las sombras propias del edificio debido a la geometría del mismo proporcionan el nivel de protección indicado para cada hora del día. En la gráfica se observan seis momentos de mayor protección. Durante los meses de invierno, la protección es mayor en las primeras y últimas horas del día, que se sitúan hacia las 6 y las 20 horas solares respectivamente. Este mismo efecto en invierno se aprecia hacia las 8 y las 16h solares respectivamente debido a que los días son más cortos.

El primer ejemplo nos sirve como base para estudiar el efecto que tiene la colocación de un dispositivo de sombra tipo voladizo sobre cada una de las paredes interiores con respecto al aumento de protección. Observando la evolución de los gráficos en función del tamaño del elemento de sombra añadido se observa la aparición de un aumento en el valor del índice IPS para las horas centrales durante los meses, sobre todo, de verano. Como se visualiza en la cresta central que aparece en la gráfica y que es más significativa a medida que aumenta el tamaño del voladizo.

Se debe puntualizar que el índice de protección solar (IPS) que hemos definido en este apartado tiene en cuenta la reducción en la cantidad de radiación directa que

existe en el edificio en un momento puntual. Pero se debe tener en cuenta que esta reducción, aunque sea importante en determinados instantes, puede no ser tan significativa en cuanto a la cantidad de energía que consigue evitar. Es decir, aunque se consiga un valor de 1 en el índice IPS en determinados momentos del día, se está protegiendo frente a toda la radiación solar directa que llega, el efecto puede resultar insignificante cuando la radiación que llega en ese instante es poca. Para tener en cuenta el efecto de reducción de energía total sobre el edificio se define el siguiente índice.

### 9.8. ÍNDICE DE REDUCCIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR DIRECTA

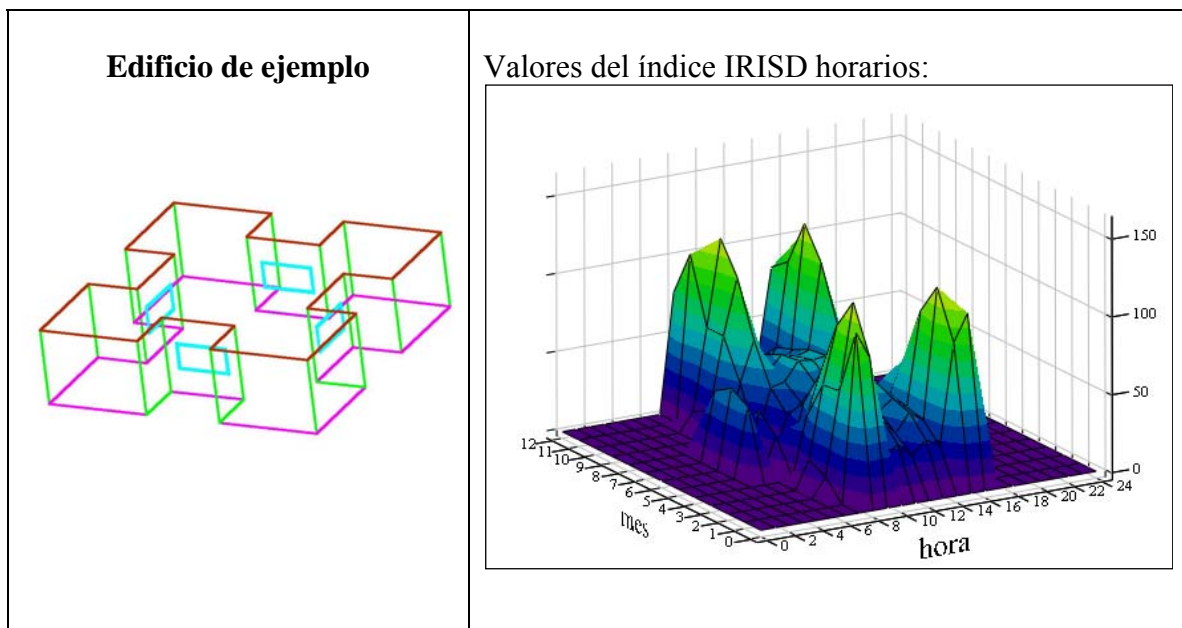
El siguiente índice llamado “Índice de reducción de la irradiación solar directa (IRISD)” pretende tener en cuenta la proporción de energía que se consigue reducir en un determinado instante respecto a la irradiación incidente en el edificio durante todo el año sin tener en cuenta la protección que presentan las sombras del mismo. La diferencia de visión de este valor frente al definido en el apartado anterior es que ahora se tiene en cuenta el efecto de reducción de energía que produce un elemento de protección o la propia geometría del edificio respecto a la cantidad total de energía que incidiría sobre el mismo si no se tuviera en cuenta el efecto de las sombras.

$$IRISD = \frac{\sum_{cerr\_ext} ((1 - F_{sol}) \cdot Radiación\_directa)}{\frac{Irradiación\_anual}{numeroHorasAño}} \cdot 100 = \frac{\sum_{cerr\_ext} (1 - F_{sol}) \cdot I_{directa} \cdot A_{cerr\_ext} \cdot \cos \theta}{\sum_{dia\_año} \sum_{hora\_dia} \left( \sum_{cerr\_ext} I_{directa} \cdot A_{cerr\_ext} \cdot \cos \theta \right)} \cdot 100$$

*numeroHorasAño*

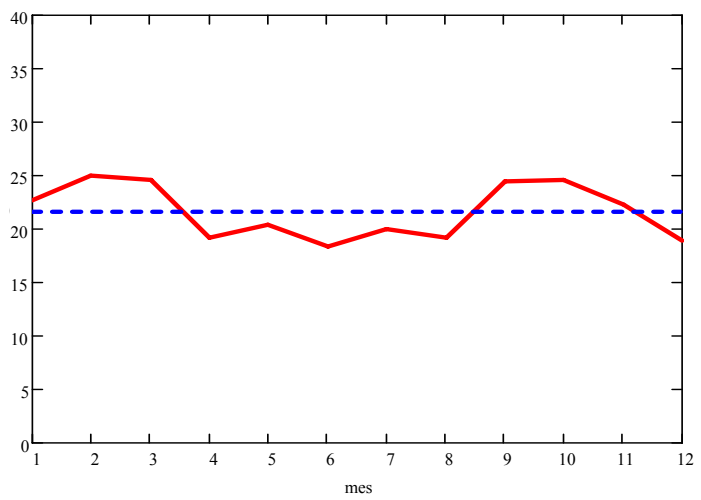
**Ecuación 79**

En el denominador de la expresión anterior se divide la irradiación anual del edificio con respecto al número de horas del año, de manera que el denominador representa un valor ficticio de radiación horaria sobre el edificio que actuaría a todas horas y cuyo objetivo es obtener un valor para el índice que no sea tan pequeño. La aplicación de este ratio sobre el edificio objeto que se ha analizado anteriormente proporciona los resultados que se muestran en las gráficas de la parte derecha de la siguiente figura.

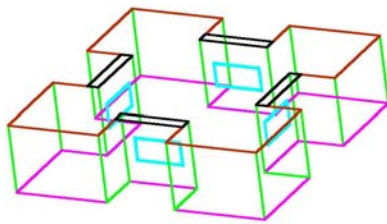


El porcentaje de radiación directa evitado por efecto de la sombra y elementos de protección representa el **21,6%** de la radiación.

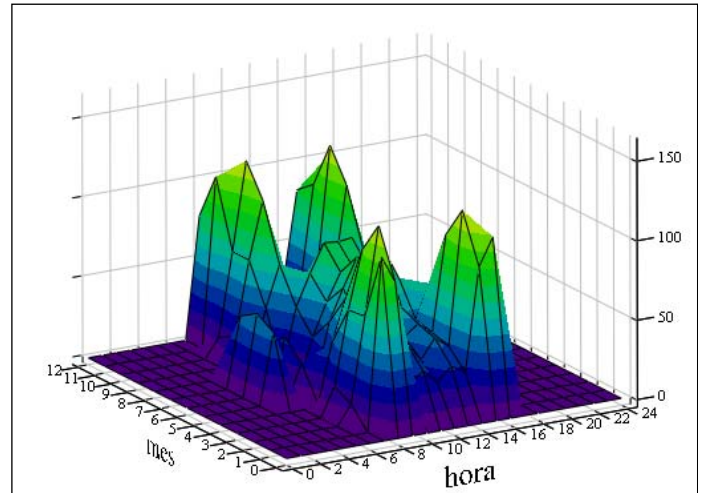
Valores del IRISD mensuales y valor anual:



**Edificio con aleros de 0.5m.**

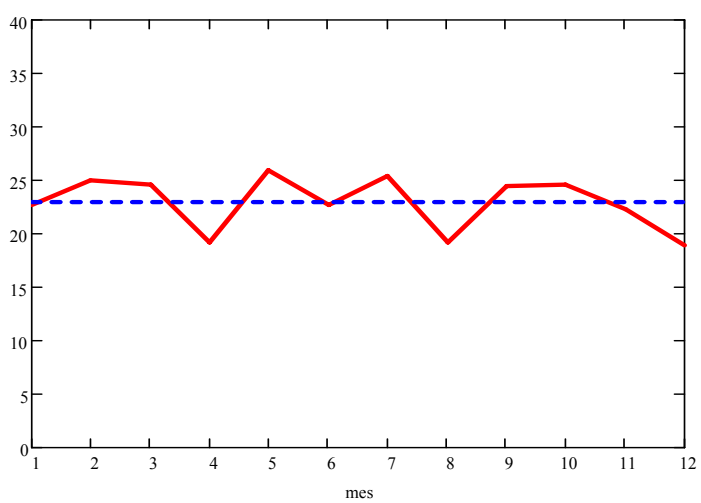


Valores del índice IRISD horarios:

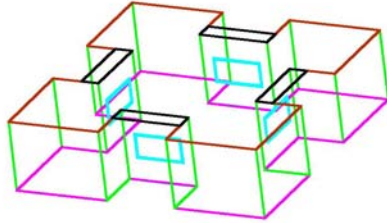


El porcentaje de radiación directa evitado por efecto de la sombra y elementos de protección representa el **23%** de la radiación.

Valores del IRISD mensuales y valor anual:

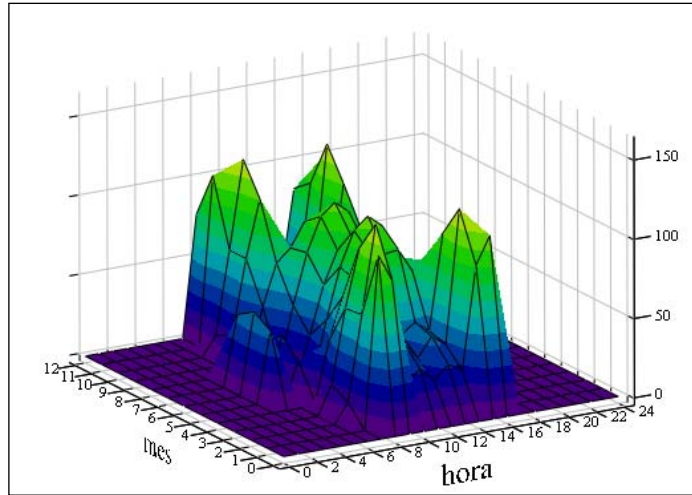


**Edificio con aleros de 0.75m.**

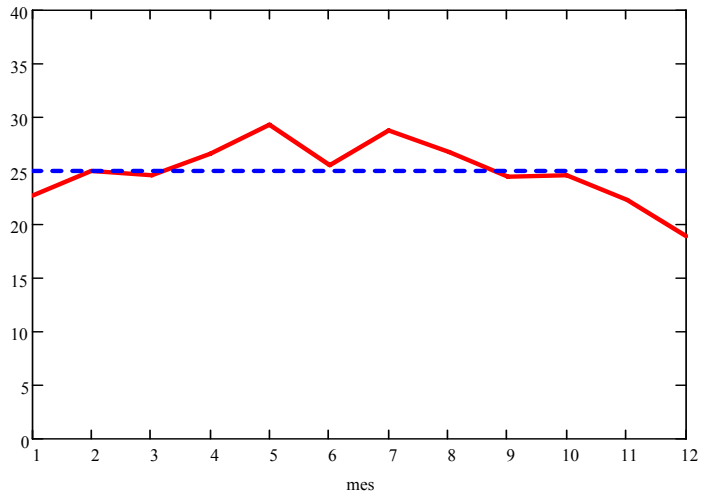


El porcentaje de radiación directa evitado por efecto de la sombra y elementos de protección representa el **25%** de la radiación.

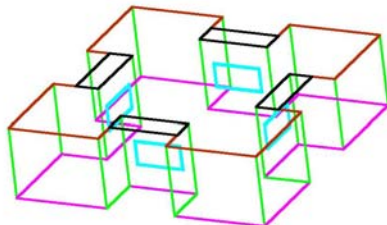
**Valores del índice IRISD horarios:**



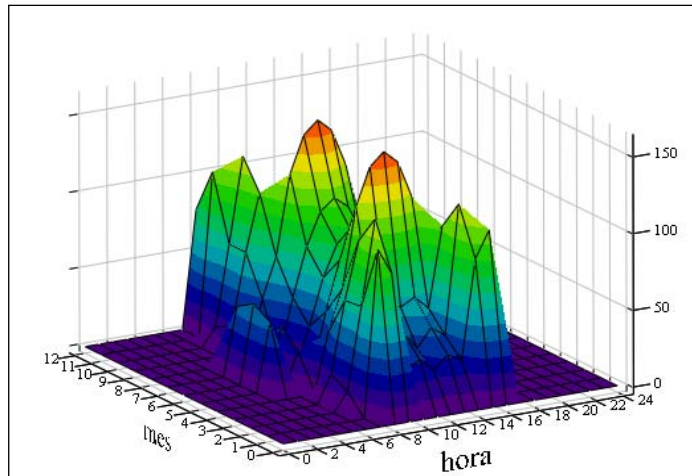
**Valores del IRISD mensuales y valor anual:**



**Edificio con aleros de 1m.**

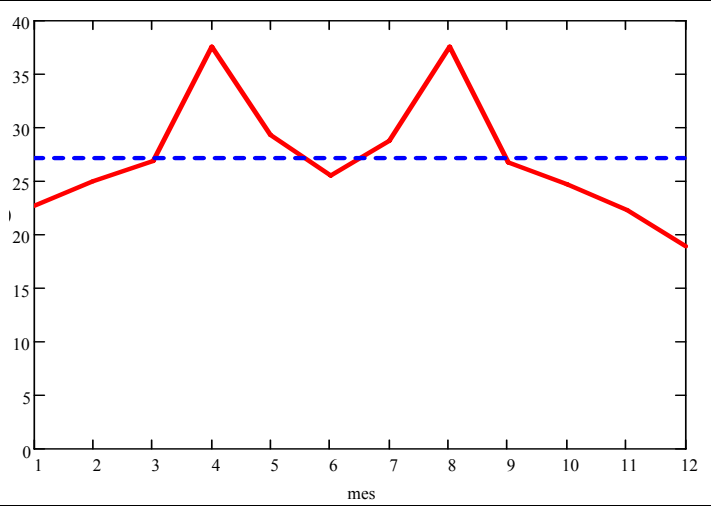


**Valores del índice IRISD horarios:**



**Valores del IRISD mensuales y valor anual:**

El porcentaje de radiación directa evitado por efecto de la sombra y elementos de protección representa el **27%** de la radiación.



**Tabla 16: Representación del valor del índice de reducción solar para cada hora del año.**

Como se observa en los gráficos, ahora los valores más significativos se sitúan en distintas posiciones respecto al índice anterior. Podemos decir que los valores anteriores se ponderan ahora respecto a la cantidad de energía que representan. Puede observarse que las crestas que aparecían en las primeras horas de los meses de mayo, junio y julio aparecen en estas nuevas gráficas con un valor más discreto ya que aunque en un momento puntual evitan una gran cantidad de la energía que incide, ésta es muy poco significativa respecto a la cantidad total que llega al edificio.

En estos nuevos gráficos se puede observar que el dispositivo de sombra colocado tiene mayor efecto cuanto mayor es su longitud, y que es en el último de los casos cuando el alero se convierte en el elemento de mayor importancia en la reducción de radiación directa sobre el edificio.

## 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 10.1. CONCLUSIONES

La aplicación del método de árboles de partición binaria del espacio aplicados en la generación de volúmenes de sombra adaptados a un programa de simulación representa la incorporación de una nueva metodología para el cálculo de las sombras en programas de éste tipo. Además de aportar mayor precisión que la mayoría de métodos existentes en este tipo de programas, ya que consigue obtener los polígonos exactos de sombra, le aporta agilidad al programa, al necesitar un menor tiempo para su cálculo.

Los resultados obtenidos en los ejemplos mostrados son satisfactorios y permiten continuar con el perfeccionamiento de esta técnica para la utilización en el programa. Las escenas que describen edificios no son excesivamente complejas ya que poseen multitud de polígonos coplanares, por ejemplo todas las paredes que forman una fachada del edificio. Lo cual, a la hora de ejecutar el cálculo reduce el número de planos que cortan el espacio, hay que recordar que los planos coplanares se representan en un mismo nodo del árbol de partición binaria del espacio (BSP tree), por lo que el árbol que representa la escena es más pequeño y los cálculos de sombra resultan más livianos. El método está diseñado para renderizar escenas mucho más complejas y elementos con geometrías no tan sencillas como un edificio, por lo que su potencialidad es superior.

En el trabajo también se han discutido diferentes temas relacionados con los programas de simulación energética de edificios: interoperabilidad con otras aplicaciones de diseño arquitectónico y estructura interna del software de cálculo. En el trabajo se ha descrito el desarrollo del formato DXF como archivo de intercambio tanto para información geométrica como para información relacionada con otro tipo de aplicaciones, capítulo 6. El uso de este formato se debe a que se trata de un código abierto y que entienden la mayoría de aplicaciones CAD con las que trabajan los profesionales. Y como uno de los objetivos es desarrollar una herramienta práctica a nivel de ingenierías, el esquema DXF nos permite conectar información que los usuarios ya manejan con la nueva aplicación de análisis térmico.

En el capítulo 7 se describe la distribución y la organización propuesta para el núcleo de un programa de simulación energética de edificios, en la actualidad la mayoría de programas muestran una estructura modular, programación orientada a objetos, con el fin de organizar la información de una manera ordenada y eficiente. En este capítulo se han descrito los distintos objetos que se han creado para describir los elementos y los agentes que intervienen en el proceso de cálculo energético del edificio, así como la relación existente entre unos y otros. La estructura modular presenta la ventaja a la hora de programar de poder realizar modificaciones en la misma de una manera relativamente sencilla. En el siguiente capítulo se detallan los procedimientos de cálculo empleados para el análisis del edificio, los cuales se han implementado en los objetos que forman la estructura modular del programa.

A continuación se comenta en los siguientes puntos algunos aspectos que todavía están por desarrollar en cuanto a la aplicación de la metodología para un cálculo más detallado de la radiación que pueden considerarse interesantes para posteriores estudios.



## 10.2. TRANSMITANCIAS NO CERO EN EL BSP TREE

El algoritmo Shadow Volumes BSP tree que se ha comentado en el capítulo 3 del trabajo se ha elaborado teniendo en cuenta que los elementos de sombra o superficies que arrojan sombra son totalmente opacos a la radiación solar directa, es decir su transmitancia es nula. Existen actualmente en el mercado elementos arquitectónicos que se instalan sobre las fachadas de los edificios y no son totalmente opacos, tienen una transmitancia distinta de cero, de esta manera consiguen reducir la cantidad de radiación directa sobre la fachada, pero sin anularla del todo.

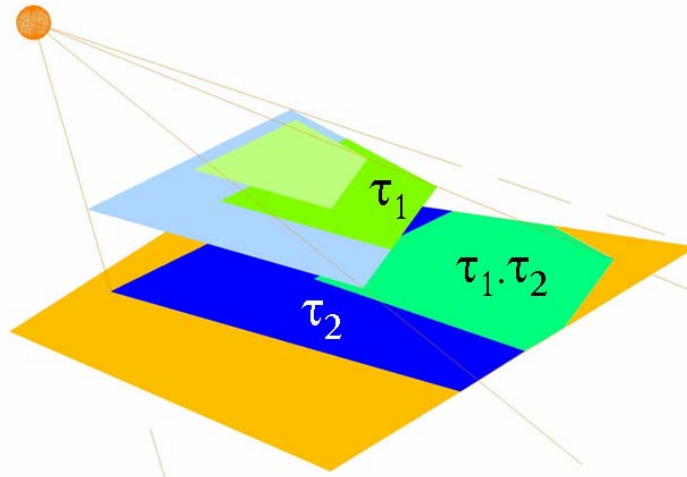


Figura 164: Escena en donde los polígonos ocluidores presentan una transmitancia distinta de cero.

Este efecto puede adaptarse también en el cálculo de las sombras expuesto anteriormente, es decir, se puede añadir el efecto de la transmitancia en el árbol. Esta modificación implicaría añadirle la propiedad de la transmitancia del elemento ocluidor al polígono de sombra que genera. De esta manera el polígono de sombra que se genera no es un polígono de oclusión total, sino que implica que existe una zona a la que hay que aplicar una cierta reducción de la cantidad de radiación incidente sobre la misma, al mismo tiempo que el nuevo polígono, en lugar de quedar apartado del cálculo, sigue formando parte del mismo y crea nuevas pirámides de sombra sobre la escena del edificio.

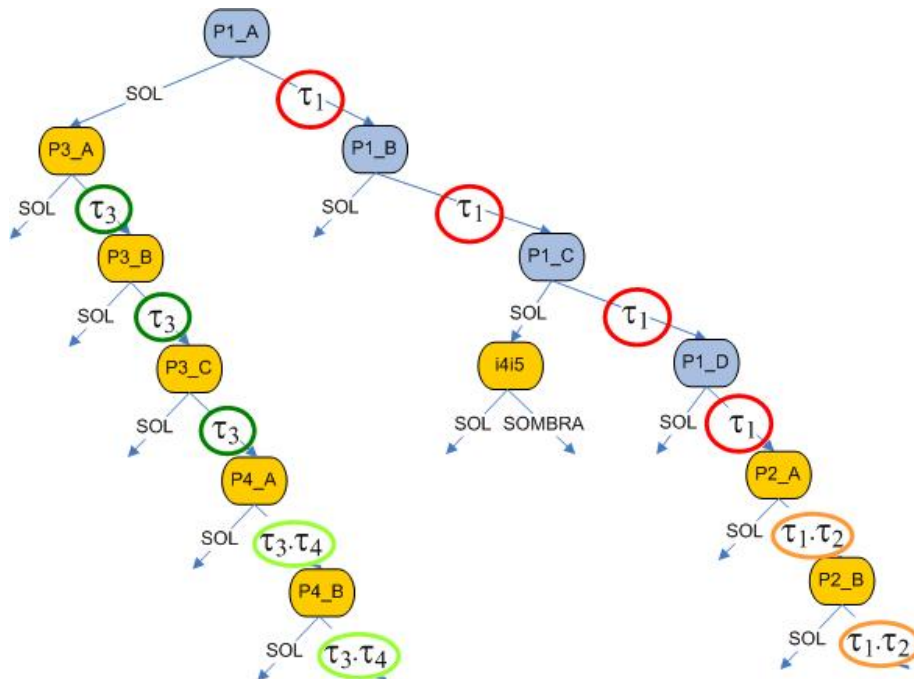


Figura 165: Árbol SVBSP en el que se aplican las transmitancias de los polígonos.

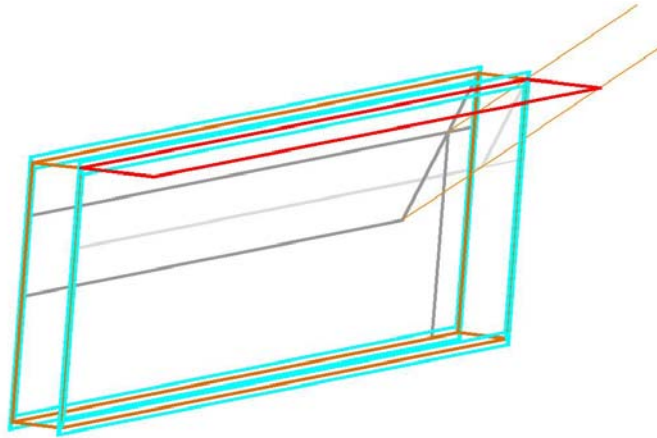
### 10.3. CÁLCULO DE POLÍGONOS INTERIORES

La metodología se ha adoptado en una primera fase para escenas de edificios en los que se considera la radiación sólo sobre la superficie exterior de los mismos (cerramientos exteriores y huecos de fachada), por lo que se ha trabajado con una única superficie que define los cerramientos, mientras que los huecos son superficies colocadas sobre las anteriores. El trabajo permite generar escenas más complejas en las que se calcule el retranqueo en ventanas y puertas e incluso la distribución de la radiación directa sobre las superficies interiores de los espacios. Éstos resultados pertenecen a una segunda fase de cálculos en los que se generan nuevas escenas con más polígonos con la finalidad de aproximar más a la realidad la definición de la envolvente del edificio. Este incremento de la complejidad de la escena lleva asociado un incremento del número de cálculos y por tanto mayores tiempos de ejecución.

El programa ofrecerá distintos niveles de cálculo de la radiación incidente en los edificios, para que el usuario pueda elegir el grado de precisión. Un primer cálculo será el que se ha descrito anteriormente, en el que se considera que las ventanas están sobre la superficie exterior del cerramiento, éste será el cálculo más simple y rápido, pero no tendrá en cuenta el retranqueo sobre los huecos ni la cantidad de radiación directa que entra sobre las superficies exteriores.

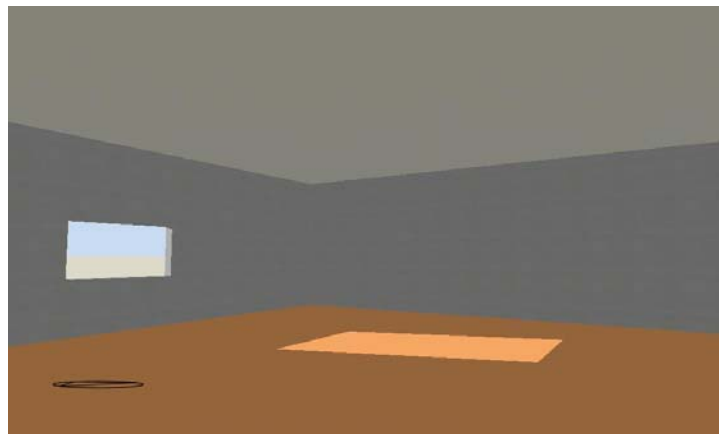
Un segundo nivel de cálculo ofrecerá la posibilidad de colocar retranqueo sobre los huecos deseados, de manera que los cálculos de la etapa anterior servirán como base para el cálculo en los huecos. Cada hueco se representará con una serie de polígonos que forman el retranqueo y se calculará la sombra generada sobre la superficie interior del mismo teniendo en cuenta la nueva escena y la sombra calculada en la etapa anterior.





**Figura 166: Sombras generadas sobre la superficie exterior del hueco y proyectadas a la superficie interior del mismo.**

El tercer nivel de cálculo corresponderá al cálculo de radiación directa que finalmente consigue penetrar en el recinto y las superficies sobre las que incidirá. En este tercer nivel se utilizarán los cálculos del nivel anterior para determinar la forma del polígono en este caso de radiación directa que incide sobre los cerramientos interiores del recinto.



**Figura 167: Vista interior de un espacio y proyección interior de la radiación directa.**

## I. ANEXO : COORDENADAS HOMOGÉNEAS

### *Introducción*

Como se ha comentado en el capítulo sobre los métodos de cálculo de sombras de los programas existentes, muchos de éstos utilizan la transformación a coordenadas homogéneas para realizar el cálculo de los polígonos de sombra, tanto para el cálculo de la proyección de la sombra sobre cualquier plano como para el cálculo de la intersección entre el polígono de sombra y el polígono sobre la que se proyecta.

Las coordenadas homogéneas tienen una gran aceptación en programas o algoritmos de computación gráfica ya que facilitan el tratamiento de transformaciones y operaciones gráficas. Son de extensa aplicación en áreas de CAD/CAM, modelado de superficies, robótica y computación de geometría proyectiva.

Uno de los motivos por el que se utilizan este tipo de coordenadas es por la posibilidad que dan de capturar el concepto de infinito. En el sistema de coordenadas Euclidiano el infinito no existe y este hecho puede ocasionar problemas en aplicaciones de computación (no se puede dividir por cero).

### *Funcionamiento*

Si consideramos dos números reales “a” y “w”, y calculamos el valor  $a/w$ , obtendremos un valor exacto para valores de  $w$  distintos de cero, pero para un valor  $w=0$  obtenemos el infinito, de este modo, podemos representar un valor infinito de la forma  $(a,0)$ .

Si aplicamos este concepto al plano x-y, el nuevo sistema de coordenadas necesita tres elementos, ahora para definir un punto  $(x,y)$  utilizamos tres datos  $(x/w, y/w, w)$ . De esta forma, una recta representada por la ecuación:

$$Ax + By + C = 0,$$

**Ecuación 80**

quedará representada en coordenadas homogéneas por la ecuación:

$$A(x/w) + B(y/w) + C = 0 \rightarrow Ax + By + Cw = 0.$$

**Ecuación 81**

En el caso de tener una ecuación de segundo grado como la siguiente:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

la misma pasa a escribirse con coordenadas homogéneas de la forma:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dxw + Eyw + Fw^2 = 0$$

Si se observa, se comprueba que al escribir las ecuaciones en forma homogénea, todos los elementos del polinomio tienen el mismo grado, tanto para la recta como para la curva de grado dos como para cualquier polinomio de grado  $n$ .

Un aspecto importante de las coordenadas homogéneas es la unificación de los eventos de traslación, escala y rotación. En el caso de trabajar con el espacio Euclídeo de  $\mathbf{R}^2$ , el movimiento de un punto  $p$  que tiene traslación, escala y rotación se representa de forma genérica:

$$p' = p \cdot A + c$$

que visto en componentes es:

$$(p'_x, p'_y) = (p_x, p_y) \cdot \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} + (c_x, c_y)$$

donde:

- $p$  y  $p'$  son puntos en  $\mathbf{R}^2$ ,
- $A$  es una matriz 2x2 y
- $c$  es un vector.

En esta formulación la traslación es tratada de forma distinta a la rotación y el escalado ya que la primera la representa el vector  $c$ , mientras las dos últimas están intrínsecas en la matriz  $A$ .

Si representamos el mismo proceso en coordenadas homogéneas la ecuación se queda como sigue:

$$(p'_x, p'_y, 1) = (p_x, p_y, 1) \cdot \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & 0 \\ a_{10} & a_{11} & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 86**

Con lo que se consiguen varios propósitos:

- la matriz es invertible (no tiene determinante cero) y
- se pueden concatenar varias transformaciones,

### **Transformaciones habituales**

- **Traslación.** Para representar solamente la traslación, la matriz debe contener el vector  $c_x$  y  $c_y$  siendo los demás elementos los que forman la matriz identidad.

$$(p'_x, p'_y, 1) = (p_x, p_y, 1) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 87**

- **Rotación.** La representación de la rotación de un elemento del plano un ángulo  $\varphi$  en sentido antihorario se representa con los elementos siguientes:

$$(p'_x, p'_y, 1) = (p_x, p_y, 1) \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 88**

- **Escalado.** Para representar el escalado de un elemento del plano, siendo  $S_x$  el ratio que aplicamos en el eje  $x$  y  $S_y$  el ratio que aplicamos al eje  $y$  modificamos la matriz del siguiente modo:

$$(p'_x, p'_y, 1) = (p_x, p_y, 1) \cdot \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Ecuación 89**

- **Secuencia.** Si deseamos aplicar una secuencia de transformaciones, el resultado será utilizar una matriz producto de las anteriores. Por ejemplo, si aplicamos una traslación, seguida de una rotación y un escalado, la matriz final es la siguiente:

$$(p'_x, p'_y, 1) = (p_x, p_y, 1) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

***Ventajas y desventajas del uso de las coordenadas homogéneas***

Las coordenadas homogéneas se utilizan ampliamente en modelado geométrico para computación, sobretodo en algoritmos de corte e intersección de polígonos. La principal razón del uso de este tipo de coordenadas es para evitar los problemas de división por cero.

La principal desventaja es su eficiencia debido a la necesidad de utilizar una coordenada más para hacer los cálculos. En espacios tridimensionales se necesitan cuatro coordenadas y matrices de 4x4, lo cual requiere mayor número de cálculos que las de menor orden. Además de esta consideración hay que tener en cuenta que las coordenadas homogéneas son más difíciles de entender que las coordenadas cartesianas.

Por otro lado, la ventaja principal del uso de este tipo de coordenadas es la uniformidad y facilidad de sus expresiones. Las transformaciones y manipulaciones de la geometría resultan bastante sencillas con el uso de matrices como las descritas anteriormente.

$$\left( \begin{array}{ccc|c} L_{11} & L_{12} & L_{13} & P_1 \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & P_2 \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & P_3 \\ \hline T_1 & T_2 & T_3 & E_1 \end{array} \right) = \left( \begin{array}{cc|c} \text{Rotación} & & \text{Perspectiv} \\ \text{Reflexión} & & \\ \text{Escalado} & & \\ \hline & & \text{Traslació} \\ & & \text{Escala} \\ & & \text{global} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{array} \right)$$

## II. ANEXO: ESTRUCTURA DE LOS ARCHIVOS CON FORMATO DXF

### SECCIÓN HEADER

0 SECTION 2 HEADER	<i>Inicio de la sección HEADER</i>
9 \$<variable> <group code> <value>	<i>Definición de cada variable de la sección de cabecera</i>
0 ENDSEC	<i>End of HEADER section</i>

### SECCIÓN CLASSES

0 SECTION 2 CLASSES	<i>Inicio de la sección CLASSES</i>
0 CLASS 1 <class dxf record> 2 <class name> 3 <app name> 90 <flag> 280 <flag> 281 <flag>	<i>Definición de cada clase</i>
0 ENDSEC	<i>Fin de la sección CLASSES</i>

### SECCIÓN TABLES

0 SECTION 2 TABLES	<i>Inicio de la sección TABLES</i>
0 TABLE 2 <table type> 5	<i>Definición de las tablas y sus códigos comunes Se repiten en cada entrada</i>

<handle> 100 AcDbSymbolTable 70 <max. entries>	
0 <table type> 5 <handle> 100 AcDbSymbolTableRecord . . <data> .	<i>Datos de la Table entry</i>
0 ENDTAB	<i>Fin de la tabla</i>
0 ENDSEC	<i>Fin de la sección TABLES</i>

## SECCIÓN BLOCKS

0 SECTION 2 BLOCKS	<i>Inicio de la sección BLOCKS</i>
0 BLOCK 5 <handle> 100 AcDbEntity 8 <layer> 100 AcDbBlockBegin 2 <block name> 70 <flag> 10 <X value> 20 <Y value> 30 <Z value> 3 <block name> 1 <xref path>	<i>Definición de cada bloque</i>
0	<i>One entry for each entity</i>

<pre>&lt;entity type&gt; . . &lt;data&gt; .</pre>	<i>definition within the block</i>
<pre>0 ENDBLK 5 &lt;handle&gt; 100 AcDbBlockEnd</pre>	<i>endblk entity para definir el fin del bloque</i>
<pre>0 ENDSEC</pre>	<i>Fin de la sección BLOCKS</i>

## SECCIÓN ENTITIES

<pre>0 SECTION 2 ENTITIES</pre>	<i>Inicio de la sección ENTITIES</i>
<pre>0 &lt;entity type&gt; 5 &lt;handle&gt; 330 &lt;pointer to owner&gt; 100 AcDbEntity 8 &lt;layer&gt; 100 AcDb&lt;classname&gt; . . &lt;data&gt; .</pre>	<i>Definición de cada entrada, entidad, en la sección</i>
<pre>0 ENDSEC</pre>	<i>Fin de la sección ENTITIES</i>

## SECCIÓN OBJECTS

<pre>0 SECTION 2 OBJECTS</pre>	<i>Inicio de la sección OBJECTS</i>
<pre>0 DICTIONARY 5 &lt;handle&gt;</pre>	<i>Inicio con el objeto Dictionary (se trata del diccionario raíz)</i>



AcDbDictionary	100	
3 <dictionary name>	350	<i>Repetición en cada entrada</i>
<handle of child>		
0 <object type>		<i>Datos de los grupos</i>
. . <data> .		
0 ENDSEC		<i>Fin de la sección OBJECTS</i>

#### FIN DEL ARCHIVO

0 EOF		<i>Fin del archivo</i>
----------	--	------------------------

### III. ANEXO3 : FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS EXTERIORES

#### III.1. ECUACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE UN MURO

La ecuación que describe la transferencia de calor a través de un material homogéneo tiene en cuenta los siguientes factores:

- la transferencia de calor a través de las superficies del contorno de un pequeño volumen de control elemental correspondiente al gradiente de temperatura existente entre ambas superficies,
- la generación de calor debida a fuentes internas en el volumen de control, y
- el cambio de energía interna del material del que se constituye el volumen de control, el cual se expresa en un cambio de temperatura en el mismo.

Con todo ello, la ecuación que resulta tiene la forma:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T - \dot{q} = 0$$

Ecuación 92

Donde,

$\rho$  representa la densidad en  $\frac{kg}{m^3}$

$C$  representa el calor específico en  $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

$k$  representa la conductividad térmica del material en  $\frac{kW}{kg \cdot K}$

$T$  es la temperatura expresada en  $K$

$\dot{q}$  son las ganancias de calor debidas a la fuente interna,  $\frac{kW}{m^3}$

$t$  es el tiempo en segundos.

Para el análisis de la transferencia de calor a través de las paredes en los edificios se pueden asumir las siguientes simplificaciones:

- la transferencia de calor se estudia en una sola dirección (eje-x), se ignoran las demás dos direcciones (eje-y y eje-z),
- el material que conforma la pared tiene propiedades isotrópicas,
- las propiedades de los materiales de la pared ( $\rho, C, k$ ) permanecen constantes a la variación de la temperatura, y

- no existen fuentes internas de calor en los materiales que forman la pared ( $\dot{q} = 0$ ).

Al aplicar estas simplificaciones la ecuación que resulta tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

**Ecuación 93**

Donde,

$\alpha$  se conoce como la difusividad térmica del material  $\left[ \frac{m^2}{kg \cdot s} \right]$  y se calcula como:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C}$$

**Ecuación 94**

Por otro lado, se debe considerar la expresión que representa el flujo de calor por conducción a través de una superficie:

$$q(x,t) = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$$

**Ecuación 95**

### III.2. CONDICIONES DE CONTORNO

La ecuación representada anteriormente es una ecuación con derivadas parciales y necesita definir unas condiciones de contorno para obtener una solución a la misma. Las condiciones de contorno típicas utilizadas en los problemas de transmisión de calor en los edificios son las siguientes:

- La temperatura en cada superficie es conocida

$$T(x,t) = f(t) \quad \text{para } x = 0, L$$

**Ecuación 96**

- Las superficies están expuestas a ambientes cuyas características se conocen y donde existe intercambio de calor por convección con el aire y por radiación con los alrededores. Por lo que los flujo de calor en ambas superficies tienen la forma:

$$q(0,t) = h_0(T_{amb,0} - T(x,t)) + q_{r,net,0}$$

**Ecuación 97**

$$q(L,t) = h_L(T(x,t) - T_{amb,L}) - q_{r,net,L}$$

**Ecuación 98**

Donde

$h_0, h_L$  representan los coeficientes de transmisión de calor por convección  $\left[ \frac{kW}{m^2 \cdot K} \right]$

$T_{amb,0}, T_{amb,L}$  representan las temperaturas del aire exterior e interior en  $K$

$q_{r,net,0}, q_{r,net,L}$  representan las ganancias de calor por radiación en cada superficie  $\left[ \frac{kW}{m^2} \right]$

### III.3. SOLUCIÓN ANALÍTICA POR TRANSFORMADA DE LAPLACE

Uno de los métodos más extendidos a la hora de resolver la ecuación de transmisión de calor consiste en aplicar la transformada de Laplace a la misma, permitiendo pasar de una ecuación en derivadas parciales a una ecuación diferencial ordinaria.

Aplicando la transformada de Laplace a la temperatura,  $L\{T(x,t)\} = T(x,s)$ , se obtiene la expresión:

$$\frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2} = \frac{s}{\alpha} T(x,s) - \frac{1}{\alpha} T(x,0)$$

**Ecuación 99**

teniendo en cuenta las condiciones iniciales:

- $T(x,0) = 0$
- $T(0,t) = f(0,t)$  que se transforma en  $T(0,s) = f(0,s)$
- $T(L,t) = 0$  que se transforma en  $T(L,s) = 0$

La Ecuación 99 queda reducida a

$$\frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2} = \frac{s}{\alpha} T(x,s)$$

**Ecuación 100**

y la solución a la misma se expresa de la forma:

$$T(x,s) = \frac{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot (L-x))}{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)} \cdot f(0,s)$$

**Ecuación 101**

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación del flujo de calor  $L\{q(x,t)\} = q(x,s)$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$q(x,s) = -k \frac{\partial T(x,s)}{\partial x}$$

**Ecuación 102**

de donde se sustituye la  $T(x,s)$  de la Ecuación 101 y queda la expresión:

$$q(x,s) = k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\cosh(\sqrt{s/\alpha} \cdot (L-x))}{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)} \cdot f(0,s)$$

**Ecuación 103**

Con las ecuaciones Ecuación 101 y Ecuación 103 aplicadas a ambas superficies de la pared ( $x = 0$  y  $x = L$ ) se definen las funciones:

$$G_{q,0}(0,s) = k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\cosh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}$$

$$G_{q,0}(L, s) = k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{1}{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}$$

$$G_{q,L}(0, s) = -k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{1}{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}$$

$$G_{q,L}(L, s) = -k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{\cosh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}$$

**Ecuación 104**

De forma matricial se expresa el valor del flujo de calor a través de las dos superficies del cerramiento de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} q(0, s) \\ q(L, s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{q,0}(0, s) & G_{q,L}(0, s) \\ G_{q,0}(L, s) & G_{q,L}(L, s) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} f(0, s) \\ f(L, s) \end{Bmatrix}$$

**Ecuación 105**

donde  $f(0, s)$  y  $f(L, s)$  representan las funciones de excitación  $T(0, s)$  y  $T(L, s)$  respectivamente.

El desarrollo anterior es válido para una sola capa de material, pero en el caso de los cerramientos normales se utilizan distintas capas de materiales para conformarlos. En este caso el resultado de la superficie de una capa es la excitación de la capa siguiente. Para poder combinar las propiedades de las distintas capas que conforman los cerramientos, la matriz se organiza de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} T(0, s) \\ q(0, s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T(L, s) \\ q(L, s) \end{Bmatrix}$$

**Ecuación 106**

$$A(s) = \cosh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)$$

$$B(s) = \frac{\sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)}{k\sqrt{s/\alpha}}$$

$$C(s) = k\sqrt{s/\alpha} \cdot \sinh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)$$

$$D(s) = \cosh(\sqrt{s/\alpha} \cdot L)$$

**Ecuación 107**

Así, un cerramiento compuesto por n capas se resolverá de la forma matricial

$$\begin{Bmatrix} T(0, s) \\ q(0, s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots (n) \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T(L, s) \\ q(L, s) \end{Bmatrix}$$

**Ecuación 108**

Los coeficientes de convección/radiación tanto en la superficie interior como en la superficie exterior se añaden multiplicando por las siguientes matrices:

$$\begin{Bmatrix} T(0, s) \\ q(0, s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/h_{ext} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1/h_{int} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T(L, s) \\ q(L, s) \end{Bmatrix}$$

**Ecuación 109**

cuyo producto genera la nueva matriz que engloba las propiedades de todas las capas del muro,

$$\begin{Bmatrix} T_{ext}(s) \\ q_{ext}(s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} AA(s) & BB(s) \\ CC(s) & DD(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_{int}(s) \\ q_{int}(s) \end{Bmatrix}$$

**Ecuación 110**

Reorganizando la información para obtener nuevamente los flujos de calor en función de las excitaciones (temperaturas) se obtiene la expresión:

$$\begin{Bmatrix} q_{ext}(s) \\ q_{int}(s) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{DD(s)}{BB(s)} & -\frac{1}{BB(s)} \\ \frac{1}{BB(s)} & -\frac{AA(s)}{BB(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_{ext}(s) \\ T_{int}(s) \end{Bmatrix}$$

**Ecuación 111**

Este método de de resolución mediante Laplace sirve como base para distintos métodos de cálculo como el de funciones de respuesta, funciones de transferencia y el método de las admitancias. A continuación se detalla la solución a la que se llega mediante el método de las funciones de respuesta que es el que se implementa en el programa.

### III.4. FUNCIONES DE RESPUESTA

El método de las funciones de respuesta fue publicado por Stephenson y Mitalas en el año 1967. La Ecuación 111 nos permite conocer los valores del flujo de calor sustituyendo las funciones de excitación que representan las temperaturas y realizando la antitransformada de la ecuación. El problema reside en que las funciones que representan las excitaciones no son continuas, ya que solamente se disponen de datos horarios de temperaturas y radiación, por lo tanto hay que reconstruirlas. La manera de reconstruirlas es utilizando un elemento formador (hold function, en la literatura inglesa) que suele ser una función triángulo. En el caso del programa vpCLIMA hemos utilizado esta función como elemento formador de la función de excitación, ya que los datos de temperatura y radiación están contabilizados de forma horaria.

Los factores de respuesta son el conjunto de valores muestreados cada cierto intervalo de tiempo (1 hora normalmente) de la respuesta de densidad de flujo de calor que se obtienen cuando se aplica la función de excitación unitaria. Por la linealidad del comportamiento del muro, la respuesta de la densidad de flujo de calor ante un valor distinto será proporcional a la respuesta de la excitación unidad. De forma matemática se definen los factores de respuesta como:

$$X(t) = L^{-1} \left\{ \frac{DD(s)}{BB(s)} f_{HOLD}(s) \right\}$$

**Ecuación 112**

$$Y(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{BB(s)} f_{HOLD}(s) \right\}$$

Ecuación 113

$$Z(t) = L^{-1} \left\{ -\frac{AA(s)}{BB(s)} f_{HOLD}(s) \right\}$$

Ecuación 114

La mejor aproximación que se hace a la función de excitación consiste en utilizar un triángulo de altura la unidad como elemento formador, de esta manera se consigue obtener una función de excitación continua cuyos puntos se unen mediante rectas.

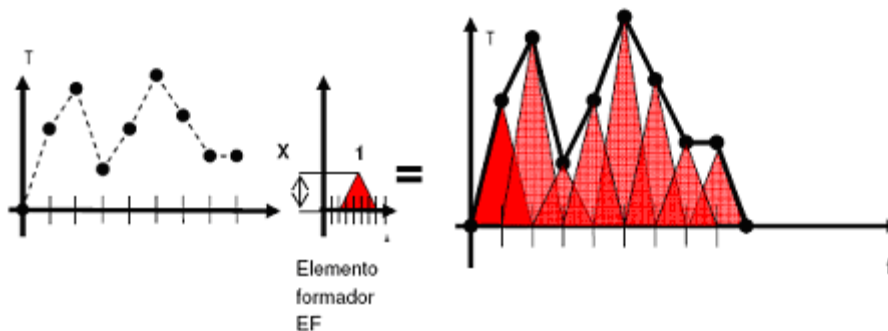


Figura 168: La función triángulo utilizada como elemento formador (hold function).

Para crear la función triángulo se utiliza la ecuación de la función rampa cuya pendiente se obtiene dividiendo la unidad por el  $\Delta t$  considerado. Para construir un triángulo utilizando la ecuación de la rampa se necesitan tres funciones distintas. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$f_{triángulo}(t) = \frac{f_R(t - \Delta t) - 2f_R(t) + f_R(t + \Delta t)}{\Delta t}$$

Ecuación 115

donde la función rampa se define como,

$$f_R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{t}{\Delta t}, & t \geq 0 \end{cases}$$

Ecuación 116

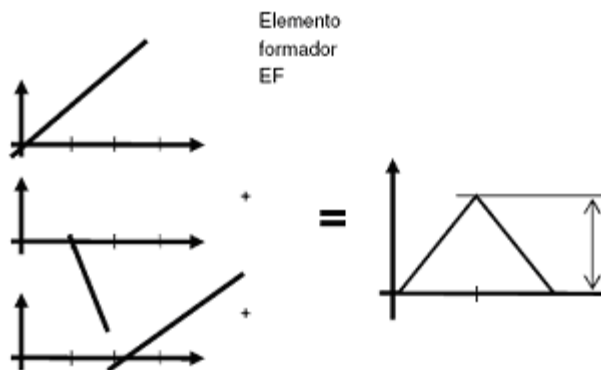


Figura 169: Construcción del elemento formador triángulo.

La función de las temperaturas total es la suma de una sucesión de triángulos de diferente altura (temperatura) decalados un cierto paso de tiempo (1 hora). De forma matemática:

$$T_{ext}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} f_{\text{triángulo},j}(t) \cdot T_{ext}(t - j\Delta t)$$

**Ecuación 117**

$$T_{int}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} f_{\text{triángulo},j}(t) \cdot T_{int}(t - j\Delta t)$$

**Ecuación 118**

La transformada de Laplace para la función rampa es

$$L\{f_R(t)\} = f_R(s) = \frac{1}{s^2}$$

**Ecuación 119**

por lo que finalmente los factores de respuesta para el elemento formador triángulo se calcularán con las siguientes expresiones:

$$X(t) = \frac{\xi(t - \Delta t) - 2\xi(t) + \xi(t + \Delta t)}{\Delta t}, \text{ siendo } \xi(t) = L^{-1}\left\{\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)}\right\}$$

**Ecuación 120**

$$Y(t) = \frac{\zeta(t - \Delta t) - 2\zeta(t) + \zeta(t + \Delta t)}{\Delta t}, \text{ siendo } \zeta(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{s^2 BB(s)}\right\}$$

**Ecuación 121**

$$Z(t) = \frac{\psi(t - \Delta t) - 2\psi(t) + \psi(t + \Delta t)}{\Delta t}, \text{ siendo } \psi(t) = L^{-1}\left\{\frac{AA(s)}{s^2 BB(s)}\right\}$$

**Ecuación 122**

De esta manera, la ecuación que representan los flujos de calor en cada superficie del cerramiento en función de las temperaturas exteriores e interiores quedan de la siguiente manera:

$$q_{int}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} T_{ext}(t - j\Delta t) \cdot Y(j) + \sum_{j=0}^{\infty} T_{int}(t - j\Delta t) \cdot Z(j)$$

**Ecuación 123**

$$q_{ext}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} T_{ext}(t - j\Delta t) \cdot X(j) - \sum_{j=0}^{\infty} T_{int}(t - j\Delta t) \cdot Y(j)$$

**Ecuación 124**



#### IV. ANEXO : CÁLCULO DE LA TEMPERATURA SOL-AIRE

En la siguiente figura se representan los intercambios de energía que aparecen en un cerramiento en contacto con el exterior.

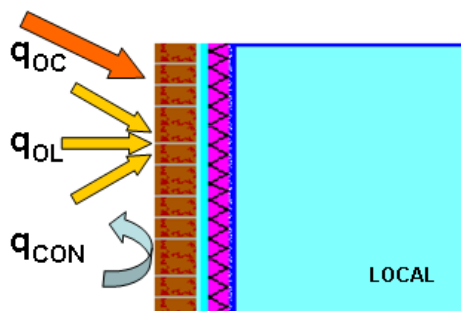


Figura 170: Balance flujos de calor en muro exterior.

En el caso de muros exteriores, la cantidad de calor que entra por unidad de tiempo por la superficie exterior se describe del siguiente modo:

$$Q_{PE} = Q_{CONV} + Q_{RAD}^{OC} + Q_{RAD}^{OL}$$

Ecuación 125

Donde:

- $Q_{PE}$  Calor que entra por la superficie exterior del muro(W)
- $Q_{CONV}$  Calor transmitido en forma de convección por el ambiente exterior(W)
- $Q_{RAD}^{OC}$  Calor transmitido en forma de radiación de onda corta por la incidencia del sol (W)
- $Q_{RAD}^{OL}$  Calor transmitido en forma de radiación de onda larga que proviene del cielo y del reflejo de las superficies de alrededor (W)

Desarrollamos cada uno de estos términos, el primero es el calor por convección que responde a la siguiente formulación:

$$Q_{CONV} = A_{PE} \cdot h_{CONV} \cdot (T_{SE} - T_{PE})$$

Ecuación 126

$$Q_{RAD}^{OC} = A_{PE} \cdot \alpha \cdot I_T(\eta, \gamma)$$

Ecuación 127

$$Q_{RAD}^{OL} = A_{PE} \cdot \alpha_{OL} \cdot \sigma \cdot F_{pared-cielo} (T_{cielo}^4 - T_{PE}^4) + \alpha_{OL} \cdot \sigma \cdot F_{pared-resto} (T_{resto}^4 - T_{PE}^4)$$

Ecuación 128

$$Q_{PE} = A_{PE} \cdot [hc_e \cdot (T_{SE} - T_{PE}) + \alpha \cdot I_T(\eta, \gamma) + q_{OL}]$$

Ecuación 129

Donde:

- $Q_{PE}$  Potencia calorífica transmitida(W)
- $A_{PE}$  Superficie del cerramiento(m<sup>2</sup>)
- $hc_e$  Coeficiente de convección exterior (W/m<sup>2</sup>K)
  - o  $hc_e = 8 + 5 \cdot v$ , donde  $v$  representa la velocidad del viento en m/s.
- $T_{SE}$  Temperatura seca exterior(°C)
- $T_{PE}$  Temperatura de la superficie exterior (°C)

- $\alpha$  Coeficiente de absorción a la radiación de la superficie exterior
  - o  $\alpha=0,90$  Pared color oscuro
  - o  $\alpha=0,75$  Pared color medio
  - o  $\alpha=0,60$  Pared color claro
- $\alpha_{OL}$  Coeficiente de absorción a la radiación de onda larga ( $\lambda > 3\mu\text{m}$ )
  - o  $\alpha_{OL} = 0,90$
- $I_T(\eta, \gamma)$  Radiación total sobre la superficie (directa + difusa) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $q_{OL}$  Flujo de calor intercambiado por radiación entre la superficie y su entorno.

El valor de  $q_{OL}$  se calcula como el intercambio de radiación entre tres superficies a temperaturas diferentes: la temperatura del cielo, la temperatura de la pared exterior y la temperatura del resto de superficies. De esta manera, el valor del intercambio de calor de onda larga en la superficie exterior del cerramiento se expresa de la siguiente manera:

$$q_{OL} = \alpha_{OL} \cdot \sigma \cdot F_{\text{pared-cielo}} (T_{\text{cielo}}^4 - T_{PE}^4) + \alpha_{OL} \cdot \sigma \cdot F_{\text{pared-resto}} (T_{\text{resto}}^4 - T_{PE}^4)$$

**Ecuación 130**

Es razonable pensar que la temperatura de la pared es muy similar o igual a la temperatura del resto de superficies, por tanto, teniendo en cuenta esta condición, la ecuación anterior se reduce a la forma:

$$q_{OL} = \alpha_{OL} \cdot \sigma \cdot F_{\text{pared-cielo}} (T_{\text{cielo}}^4 - T_{PE}^4)$$

**Ecuación 131**

Definimos el coeficiente equivalente de radiación de esta manera

$$h_{\text{rad}} = \alpha_{OL} \cdot \sigma \cdot F_{\text{pared-cielo}} (T_{\text{cielo}}^2 + T_{PE}^2) \cdot (T_{\text{cielo}} + T_{PE})$$

**Ecuación 132**

y simplificamos la Ecuación 131:

$$q_{OL} = h_{\text{rad}} (T_{\text{cielo}} - T_{PE})$$

**Ecuación 133**

El valor de la  $T_{\text{cielo}}$  se puede expresar en función de la temperatura seca exterior y la diferencia de ésta respecto al cielo

$$T_{\text{cielo}} = T_{SE} - \Delta T_c$$

**Ecuación 134**

con esta nueva transformación, la Ecuación 130 queda de la forma:

$$q_{OL} = h_{\text{rad}} (T_{SE} - T_{PE}) - h_{\text{rad}} \cdot \Delta T_c$$

**Ecuación 135**

Con estas consideraciones, la Ecuación 125 se puede expresar así:

$$Q_{PE} = A_{PE} \cdot [(hc_e + h_{\text{rad}}) \cdot (T_{SE} - T_{PE}) + \alpha \cdot I_T(\eta, \gamma) - h_{\text{rad}} \cdot \Delta T_c]$$

**Ecuación 136**

Definiendo ahora el valor de la temperatura sol-aire de la siguiente manera:

$$T_{SA} = T_{SE} + \frac{\alpha \cdot I_T(\eta, \gamma)}{hc_e + h_{rad}} - \frac{h_{rad} \cdot \Delta T_c}{hc_e + h_{rad}}$$

**Ecuación 137**

nos queda la expresión final del calor a través de la superficie exterior del muro de la forma:

$$Q_{PE} = A_{PE} \cdot (hc_e + h_{rad}) \cdot (T_{SA} - T_{PE})$$

**Ecuación 138**

Donde:

- $Q_{PE}$  Potencia calorífica transmitida en la superficie exterior(W)
- $A_{PE}$  Superficie del cerramiento( $m^2$ )
- $hc_e$  Coeficiente de convección exterior ( $W/m^2K$ )
- $hc_{rad}$  Coeficiente equivalente de radiación ( $W/m^2K$ )
- $T_{PE}$  Temperatura de la superficie exterior ( $^{\circ}C$ )
- $T_{SA}$  Temperatura sol-aire( $^{\circ}C$ )

Se debe comentar que el valor del último parámetro de la expresión de la  $T_{SA}$  es muy pequeño, entre  $0,03^{\circ}C$  y  $1,65^{\circ}C$ , por lo que se tiende a despreciar a la hora de calcular la temperatura sol-aire del muro.

Por tanto, la temperatura sol-aire nos permite conocer la cantidad de calor que entra por conducción desde el exterior en cada instante. La temperatura sol-aire es un parámetro que depende de varios factores:

- La radiación solar
- El factor de visión del cielo y alrededores
- La temperatura seca exterior