

# Dibujo automático de distribuciones en planta a partir de un grafo de adyacencias

Alfonso Recuero y Olga Ríó

Instituto de Ciencias de la Construcción E. Torroja-CSIC  
Serrano Galvache s/n, 28033 Madrid, España  
Tel.: 34-91-302 04 40; Fax: 34-91-302 07 00  
e-mail: recuero@ietcc.csic.es  
e-mail: rio@ietcc.csic.es

Marina Álvarez y Mónica San José

Facultad de Informática-UPM  
Campus de Montegancedo, 28660 Madrid, España  
Tel.: 34-91-336 69 37; Fax: 34-91-336 69 42  
e-mail: malvarez@fi.upm.es  
e-mail: msanjose@polar.es

## Resumen

Se presentan algoritmos capaces de automatizar el desarrollo del proyecto arquitectónico por ordenador, llegando hasta la generación automática de esquemas adimensionales de distribución del espacio en las dos dimensiones de la planta de un edificio a partir de las condiciones impuestas por el proyectista. La búsqueda de soluciones para el trazado de esquemas adimensionales de distribución de edificios en planta se ha realizado tratando de reconstruir el proceder del hombre ante este tipo de cuestiones mediante el desarrollo de dos algoritmos: uno para el trazado de los locales exteriores, basado en la división en partes iguales de los lados de la planta. Y un segundo algoritmo para el trazado de locales interiores, basado en una técnica de búsqueda heurística profunda, con evaluación de nodos intermedios y vuelta atrás (backtracking).

**Palabras clave:** *diseño asistido por computador, diseño arquitectónico, teoría de grafos.*

## AUTOMATIC DRAWING OF PLAN DISTRIBUTIONS FROM AN ADJACENCY GRAPH

## Summary

Algorithms to automate the architectural design development are presented. Starting from the conditions imposed by the designer they automatically generate the a-dimensional 2D space distribution. The search for the solutions of a-dimensional 2D distributions tries to reproduce man wise procedure by means of two algorithms: one deals with the drawing of the external spaces and is based on the equal part division of the plan sides. The other one deals with the drawing of the internal spaces and is based on an heuristic search in depth with backtracking.

**Keywords:** *CAD, architectonic design, graph theory.*

## INTRODUCCIÓN

Desde el comienzo del uso de los ordenadores y a lo largo de toda su historia se ha mostrado un gran interés por la aplicación que los mismos pudieran tener en la automatización del proyecto arquitectónico, aunque los logros han sido limitados hasta el momento.

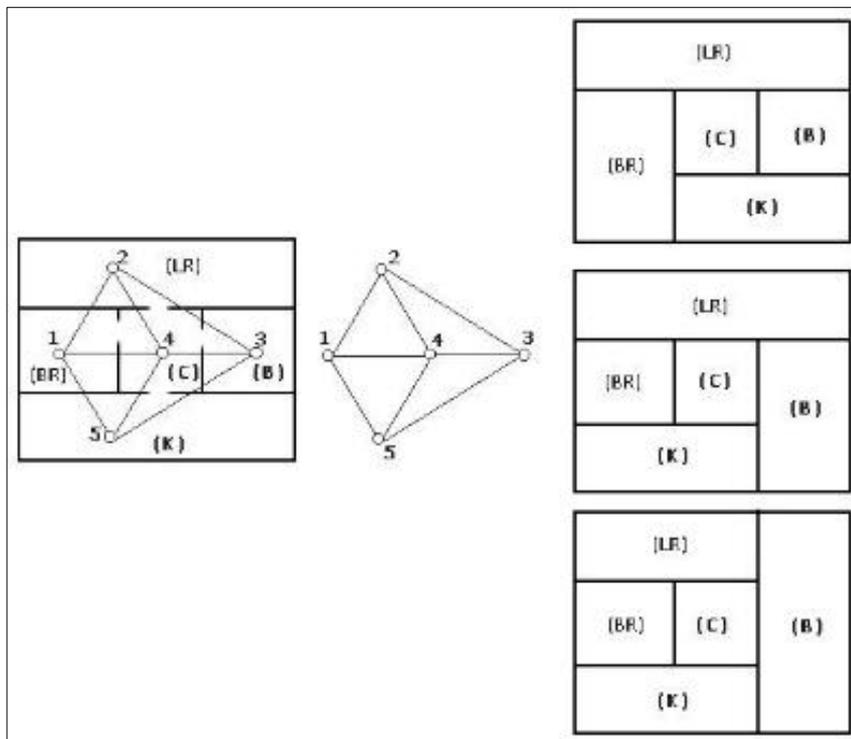
La mayoría de las aplicaciones prácticas, que han ido apareciendo, están dirigidas al cálculo de estructuras, confección de mediciones y presupuestos, dibujo, etcétera. Estos programas de CAD/CAE son capaces de realizar el almacenamiento, recuperación y manipulación de los datos introducidos, lo que automatiza el desarrollo de un proyecto concreto, pero sin embargo no permiten la automatización del estudio de soluciones alternativas.

Desde la década de los 60 han sido numerosas las propuestas de métodos para abordar el problema de generación de esquemas de edificios en planta<sup>1-8</sup>. En general el proceso se plantea mediante la solución de dos fases sucesivas:

- generación de esquemas adimensionales y
- dimensionamiento.

A la hora de abordar la primera de las fases, el problema de generación de esquemas adimensionales de edificios en planta, existen esencialmente dos planteamientos: el de optimización y el combinatorio.

- En el planteamiento de optimización se intenta buscar la mejor distribución de los espacios definiendo la disposición óptima mediante una función objetivo que expresa, bien recorridos entre dos actividades, bien adyacencia entre espacios<sup>1-4</sup>.
- En el planteamiento de tipo combinatorio se intenta generar soluciones posibles que cumplan unas condiciones determinadas debidas a características espaciales, tales como interrelaciones geométricas entre locales, orientaciones y limitaciones dimensionales<sup>5-8</sup>.



**Figura 1.** Realizaciones de un grafo

En general, la teoría de grafos<sup>1-14</sup> ha sido el instrumento matemático utilizado para representar de forma abstracta los distintos tipos de relaciones entre los diferentes recintos que constituyen una planta.

Un grafo es un conjunto de nodos y aristas que los unen<sup>15-18</sup>. Si hacemos corresponder a cada recinto un vértice y consideramos las relaciones de adyacencia entre ellos como las aristas que unen dichos vértices, tendremos un grafo simple, comúnmente denominado “grafo de adyacencia”. De este grafo diremos que la distribución en planta que lo origina es una realización del grafo<sup>19-20</sup>. A cada distribución le corresponde un único grafo, pero a cada grafo le pueden corresponder distintas distribuciones sobre una planta (Figura 1).

La posibilidad de poder plasmar los grafos que reflejan las condiciones de diseño prefijadas sobre la planta del edificio es lo que se denomina realizabilidad<sup>9-20</sup> del grafo. Las distintas soluciones de este problema representan las diferentes alternativas que pueden ser consideradas en el proceso de proyecto arquitectónico.

En la mayor parte de los casos las plantas de los edificios son de lados paralelos o perpendiculares y las habitaciones o recintos son rectangulares. Resulta, pues de gran interés, disponer de algoritmos que permitan comprobar primero, si es posible realizar los mencionados grafos sobre la planta disponible, y, en caso afirmativo, generar todas las posibles distribuciones.

El problema básico puede reducirse al caso de una planta rectangular recubierta por habitaciones rectangulares, pudiendo posteriormente generalizarse a plantas de lados paralelos o perpendiculares entre sí.

No existe un algoritmo que resuelva completamente este problema. Los autores han presentado un procedimiento heurístico<sup>19-20</sup> que parece resolverlo, puesto que no se han encontrado excepciones, pero no han podido demostrar concluyentemente que es condición suficiente. Los autores de otros trabajos referenciados hasta el momento<sup>9-14</sup> que utilizan la teoría de grafos para generar distribuciones de plantas, no lo hacen sobre plantas prefijadas y además obligan a tomar decisiones previas sobre posiciones relativas de los rectángulos. Sin embargo, hay requerimientos que pueden cumplirse de varias formas, tal como que dos habitaciones pueden ser contiguas en cualquier dirección. El método propuesto por los autores de este trabajo es más general, pues no impone condiciones a priori sobre las posiciones relativas entre habitaciones, si bien, en principio, es válido para plantas rectangulares, que son las únicas convexas que pueden ser cubiertas por rectángulos.

El planteamiento para el proceso de generación automática de plantas se realiza en cuatro etapas sucesivas:

1. determinar la realizabilidad de los grafos o grafo sobre una planta elegida,
2. en caso afirmativo, generar todas las posibles soluciones topológicamente correctas,
3. generar la realización adimensional de las soluciones topológicamente correctas,
4. imponer el cumplimiento de las condiciones dimensionales, etc.

Las tres primeras etapas cubren la primera fase (generación de plantas de forma adimensional) y la cuarta corresponde a la segunda fase (dimensionamiento de la planta).

El algoritmo completo se ha estructurado en los siguientes pasos:

- a) en caso de planta no rectangular reducir la misma a planta rectangular mediante la adición de recintos ficticios adecuados, que a su vez deben ser incluidos en los grafos a comprobar,
- b) comprobar la realizabilidad del grafo sobre la planta rectangular,
- c) generar las posibles soluciones topológicamente correctas sobre plantas rectangulares,
- d) dibujar en forma adimensional las soluciones topológicamente correctas,
- e) imponer las condiciones dimensionales, de orientación, etc., para dibujar las plantas dimensionadas.

La descripción de las fases a)-c) ya ha sido presentada de forma teórica<sup>17-18</sup>. En el presente trabajo se aborda la solución de la etapa 3 (paso d) del algoritmo). Para ello se plantean dos algoritmos: uno para el trazado de los locales exteriores, basado en la división en partes iguales de los lados del rectángulo principal (a partir de ahora la planta) y un segundo algoritmo para el trazado de locales interiores, basado en una técnica de búsqueda heurística exhaustiva, con evaluación de nodos intermedios y *backtracking*.

## CONCEPTOS PREVIOS

Al tratarse de un algoritmo relacionado con otros presentados anteriormente es conveniente describir algunos conceptos particulares utilizados en dichos algoritmos, así como introducir brevemente algunos términos de los procedimientos heurísticos que no son de uso general.

### Procedimientos heurísticos

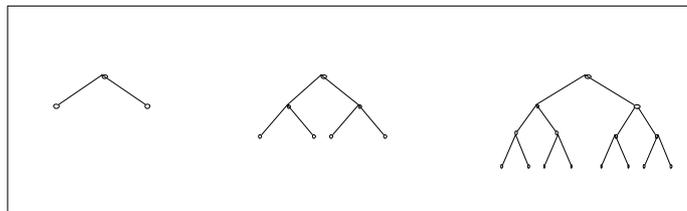
En el desarrollo de este trabajo se han empleado los procedimientos heurísticos, es decir, se busca la solución o soluciones a través de una secuencia de estados, con una evaluación en cada paso basada en el estado parcial de los datos especificados.

El proceso se representa en un árbol estado-acción, donde el vértice raíz representa el estado inicial de los datos, las ramas son operaciones alternativas que pueden llevarse a cabo, los nodos intermedios son soluciones parciales y los nodos finales soluciones definitivas.

Se puede añadir en la búsqueda heurística que, cuando se evalúe un nodo intermedio y se reconozca que no va a terminar en una solución válida, se lleve a cabo una estrategia de *backtracking*, es decir, se puede esa rama y se retroceda en el árbol.

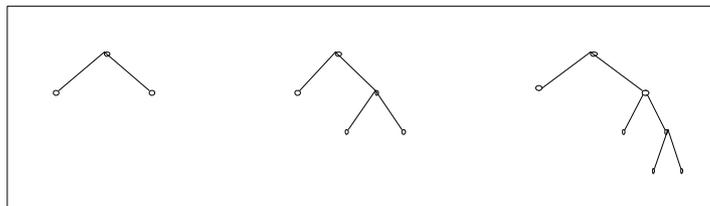
Según se realice la exploración del árbol estado-acción se tiene una búsqueda en anchura o una búsqueda profunda.

- Búsqueda en anchura: donde todos los vértices del mismo nivel del árbol son generados antes que cualquier vértice del siguiente nivel (Figura 2).



**Figura 2** Búsqueda en anchura

- Búsqueda profunda: donde se explora primero un camino del árbol hasta el final y se van generando las distintas alternativas mediante un proceso de *backtracking* (Figura 3).



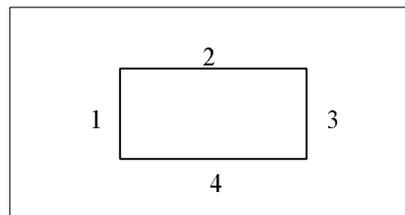
**Figura 3** Búsqueda profunda

También se puede realizar una búsqueda que sea combinación de las dos anteriores.

### Terminología utilizada

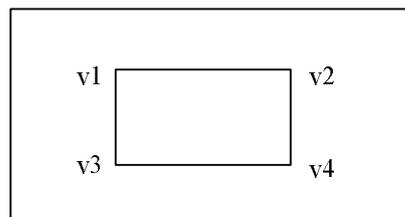
Se incluyen en el apartado algunos términos utilizados a lo largo del trabajo:

- Numeración de lados exteriores: los lados exteriores de la planta se enumeran del 1 al 4 en el sentido de las agujas del reloj, comenzando por el lado vertical izquierdo (Figura 4).



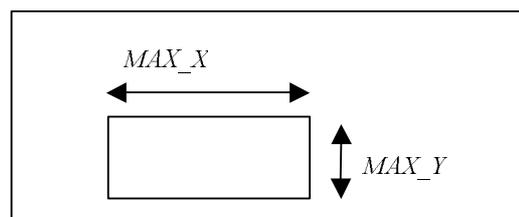
**Figura 4.** Numeración de los lados exteriores de un local

- Numeración de los vértices de un local: se enumeran de forma semejante a los lados, asignando el número 1 a la esquina superior izquierda, como se indica en la Figura 5.



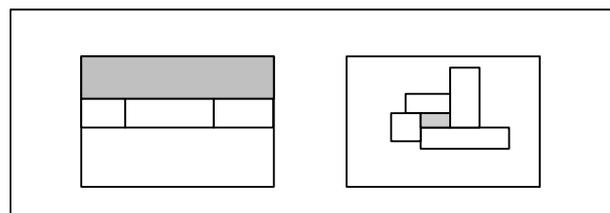
**Figura 5.** Vértices de un local

- Dimensiones de la planta: las dimensiones de la misma se definen como las variables  $MAX\_X$  y  $MAX\_Y$ , como se puede ver en la Figura 6.



**Figura 6.** Dimensiones máximas de la planta

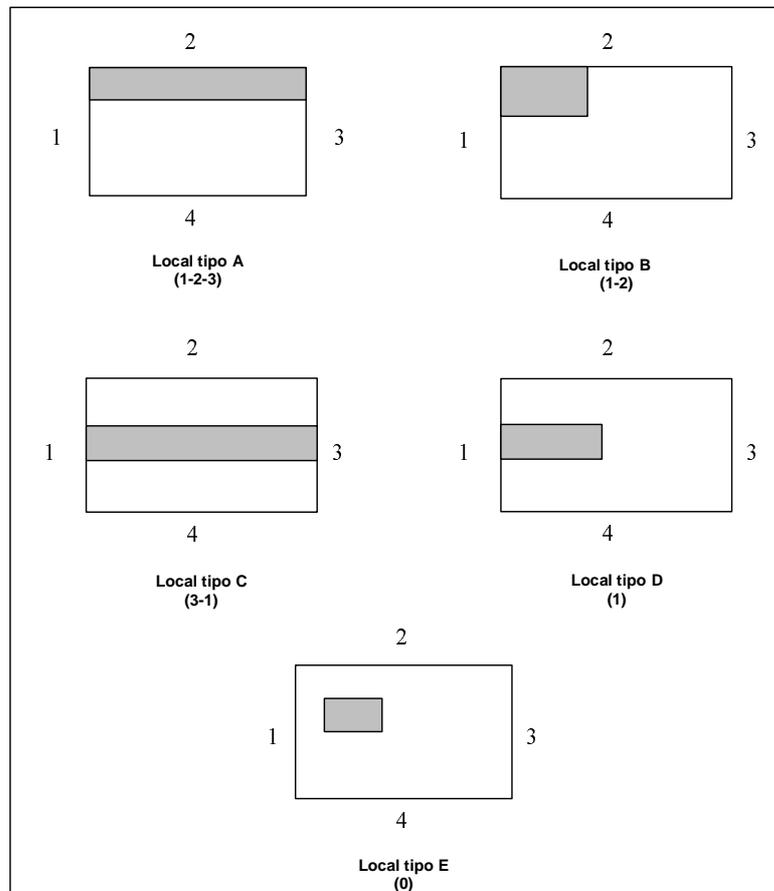
- Envoltura de un local: es el conjunto de locales que tienen contacto con él (gris en la figura), como se indica en la Figura 7.



**Figura 7.** Envoltura real de un local

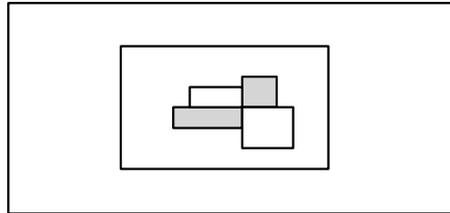
- Locales:

- o Exteriores: si los vértices de su envoltura no forman un ciclo (envoltura abierta). Existen cuatro tipos de locales exteriores (Figura 8).
    - tipo A: 3 lados exteriores consecutivos,
    - tipo B: 2 lados exteriores consecutivos,
    - tipo C: 2 lados exteriores no consecutivos,
    - tipo D: 1 lado exterior.
  - o Interiores: si los vértices de su envoltura forman un ciclo (envoltura cerrada). Local tipo E (Figura 8). En el caso de locales interiores se utiliza el concepto de:
    - Envoltura ficticia: es un término que se usa en la colocación de los locales interiores. La envoltura ficticia de un local es la envoltura calculada recursivamente sobre su envoltura real hasta que exista un local tipo D o un local interior previamente colocado. Por lo tanto, la envoltura ficticia de un local se calcula cuando ocurre esta circunstancia en la propia envoltura real de dicho local.
- Los locales tipo C son poco comunes y dividen en dos partes independientes la planta. Se considera, pues, que la partición de un local de este tipo divide el problema inicial en subproblemas independientes. Por lo tanto, estos locales no van a aparecer como parte del problema y no se tienen en cuenta.



**Figura 8.** Tipos de locales

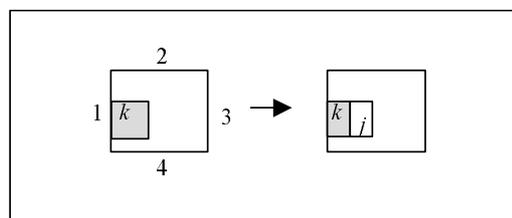
Verticales, se denominan así los locales que están conectados sólo por un vértice (grises entre sí o blancos entre sí) (Figura 9).



**Figura 9.** Locales verticales

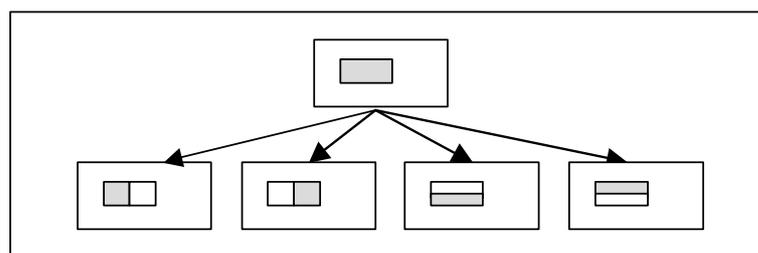
- Posiciones de un local interior: como se detallará más adelante, el principio básico para el trazado de los locales interiores o locales tipo E es el de colocar los locales interiores dentro de los locales exteriores tipo D o dentro de los locales interiores previamente trazados en la planta con una serie de restricciones. Por lo tanto, para poder comprender el algoritmo para el trazado de locales interiores es necesario conocer las diferentes posibilidades que existen a la hora de colocar un local interior dentro de un local exterior tipo D o dentro de otro local interior existentes en el trazado de planta.

Por un lado, un local interior sólo puede colocarse dentro de un local exterior tipo D, ocupando un área igual a la mitad opuesta al lado exterior de este último. Es decir, si el local  $k$  es de lado exterior 1, como el de la Figura 10, el local interior  $j$  ocupará su mitad derecha. Si es de lado exterior 2, ocupará la mitad inferior, de lado exterior 3 la mitad izquierda y de lado exterior 4 la mitad superior.



**Figura 10.** Colocación de  $j$  interior en  $k$  interior tipo D de lado exterior 1

Por otro lado, cuando se coloca un local interior (en blanco en la Figura 11) dentro de otro también interior (en gris en la Figura 11), puede ocupar cualquiera de las cuatro posibles mitades del mismo: izquierda o derecha (si se hace una división vertical del local interior), inferior o superior (si se hace una división horizontal del local interior).



**Figura 11.** Colocación del local interior en otro local

## DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

La información suministrada por el algoritmo de generación de soluciones topológicamente correctas (paso c del proceso general) y que sirve como dato de entrada del paso d) es la lista con todos los locales que deben participar y para cada local, el tipo (interior o exterior), si es exterior los lados exteriores, la envoltura real del local, si el local es vertical o no, y si es vertical, el local o locales verticales a él.

Las etapas del algoritmo que se describe son:

1. tratamiento de los datos de entrada,
2. trazado de locales exteriores (tipos A, B y D),
3. trazado de locales interiores (tipo E).

### Tratamiento de los datos de entrada

- Clasificación de los locales: dependiendo del número de lados exteriores de cada local y la consecutividad de los mismos se generan cuatro listas de locales de los diferentes tipos ya vistos:
  - o locales tipo A: 3 lados exteriores consecutivos: 1-2-3, 2-3-4, 3-4-1, 4-1-2,
  - o locales tipo B: 2 lados exteriores consecutivos: 1-2, 2-3, 3-4, 4-1,
  - o locales tipo D: 1 lado exterior: 1, 2, 3 y 4,
  - o locales tipo E: 0 lados exteriores.
- Cálculo del número de locales por cada lado exterior: se calculan las siguientes constantes que serán utilizadas para el trazado de locales exteriores:
  - N1: número de locales con un lado exterior en el lado 1,
  - N2: número de locales con un lado exterior en el lado 2,
  - N3: número de locales con un lado exterior en el lado 3,
  - N4: número de locales con un lado exterior en el lado 4.

### Trazado de locales exteriores

El algoritmo para el trazado de locales exteriores se ejecuta colocando los locales clasificados por tipos, dependiendo de la dificultad de cada tipo, de mayor a menor complejidad. Así se colocan primero los locales tipo A, luego los de tipo B y finalmente los de tipo D. A continuación se generan las raíces de los árboles estado-acción y se corrigen los huecos y solapamientos entre locales exteriores que se hayan producido.

El algoritmo consta de cinco etapas:

- a) trazado de locales tipo A,
- b) trazado de locales tipo B,
- c) trazado de locales tipo D,
- d) generación de raíces,
- e) detección y corrección de huecos y solapamientos.

El principio básico para el trazado de locales exteriores es el de “colocar los locales exteriores dividiendo los lados exteriores de la planta en partes iguales”, que es la forma más sencilla computacionalmente.

#### a) Trazado de locales tipo A

En un local tipo A sólo es necesario fijar una de las dimensiones de cada local (alto o ancho), ya que la otra viene fijada por dos de los vértices de la planta. La ecuación que define esta coordenada libre suponiendo  $l$ ,  $m$ ,  $n$  lados exteriores consecutivos del local  $j$  y  $m$  lado que ocupa una dimensión completa de  $j$ , es (Figura 12)

$$d \text{ coordenada\_libre} = \text{MAX\_coordenada\_libre} / \text{MAX}(Nl, Nn)$$

donde  $d \text{ coordenada\_libre} = dx$  si  $m$  es vertical y  $dy$  si  $m$  es horizontal,  $\text{MAX\_coordenada\_libre} = \text{MAX\_X}$  si  $dx$ ,  $\text{MAX\_Y}$  si  $dy$   $\text{MAX}(Nl, Nn)$  máximo entre  $Nl$  y  $Nn$ ,  $Nl$  número de locales en el lado exterior  $l$  y  $Nn$  número de locales en el lado exterior  $n$ .

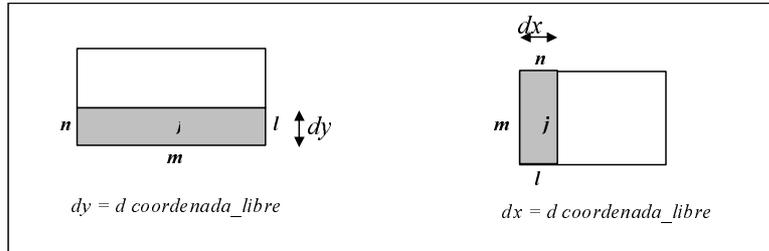


Figura 12. Trazado de locales tipo A

Este tipo de locales ocupa parte de dos lados exteriores opuestos, por lo que se complica la división en partes iguales en ambos lados:

- Si se hace la división según el lado que menor número de locales tiene, se produce un solapamiento entre locales del lado opuesto.
- Por el contrario, si se realiza según el lado de mayor número de locales, se genera un hueco entre locales exteriores del lado opuesto.

La solución al segundo problema es más sencilla de tratar, por lo que se opta por esta división y de ahí que se divida el lado entre el máximo de los locales de ambos lados (Figura 13).

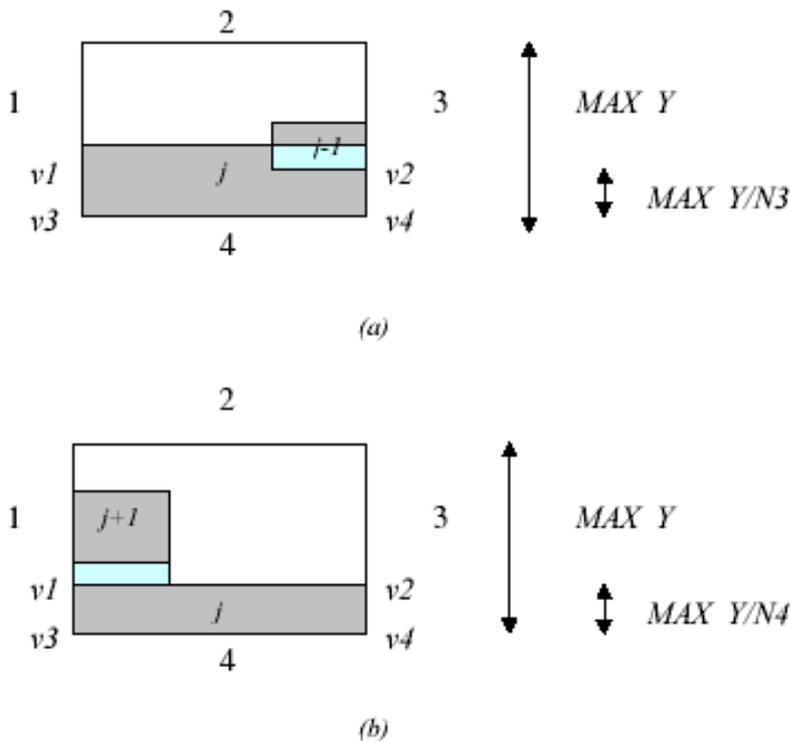
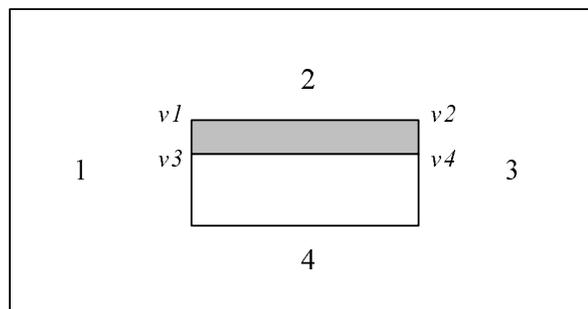


Figura 13. Hueco y solapamiento entre locales

Por ejemplo, para el trazado de local tipo A (Figura 14) con lados exteriores 1-2-3 y vértices  $v1$ ,  $v2$ ,  $v3$  y  $v4$ , el proceso es el siguiente

$$\begin{aligned} v1 \cdot x &= 0 \cdot 0 & v1 \cdot y &= 0 \cdot 0 \\ v2 \cdot x &= MAX\_X & v2 \cdot y &= v1 \cdot y \\ v3 \cdot x &= v1 \cdot x & v3 \cdot y &= MAX\_Y / MAX(N1, N3) \\ v4 \cdot x &= v2 \cdot x & v4 \cdot y &= v3 \cdot y \end{aligned}$$

donde  $MAX\_X$  y  $MAX\_Y$  son las dimensiones del rectángulo que representa la planta completa y  $MAX(N1, N3)$  es el máximo entre el número de locales del lado exterior 1 ( $N1$ ) y el número de locales del lado exterior 3 ( $N3$ ).



**Figura 14.** Local tipo A, 1-2-3

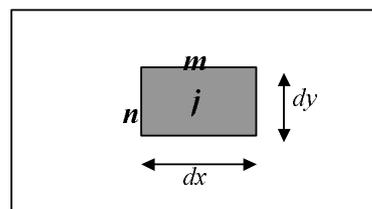
Al dividir la longitud total del lado exterior, ocupado totalmente por el local ( $MAX\_Y$ ), entre el máximo del número de locales del lado exterior 1 y del lado exterior 3 ( $MAX(N1, N4)$ ), se consigue dar la dimensión más pequeña para dicho local.

### b) Trazado de locales tipo B

En los locales tipo B es necesario fijar las dos dimensiones (alto y ancho) y se conoce uno de los vértices correspondiente a uno de los vértices de la planta. Suponiendo  $m$  lado exterior horizontal y  $n$  lado exterior vertical de local  $j$  (Figura 15), el ancho del local será igual a la longitud del lado horizontal ( $MAX\_X$ ) dividido entre el número de locales de ese lado. Asimismo, el alto del local será igual a la longitud del lado vertical de planta ( $MAX\_Y$ ) dividido entre el número de locales de ese lado

$$\begin{aligned} dx &= MAX\_X / Nm \\ dy &= MAX\_Y / Nn \end{aligned}$$

donde  $Nm$  es el número de locales con lado exterior  $m$ ,  $Nn$  el número de locales con lado exterior  $n$ ,  $dx$  ancho del local  $j$  y  $dy$  alto del local  $j$ .



**Figura 15.** Alto y ancho de local tipo B

En la Figura 16 se muestra el caso particular del local tipo B con lados exteriores 1-2 y vértices  $v1, v2, v3$  y  $v4$ .

$$\begin{aligned}
 v1 \cdot x &= 0 \cdot 0 & v1 \cdot y &= 0 \cdot 0 \\
 v2 \cdot x &= MAX\_X/N2 & v2 \cdot y &= v1 \cdot y \\
 v3 \cdot x &= v1 \cdot x & v3 \cdot y &= MAX\_Y/N1 \\
 v4 \cdot x &= v2 \cdot x & v4 \cdot y &= v3 \cdot y
 \end{aligned}$$

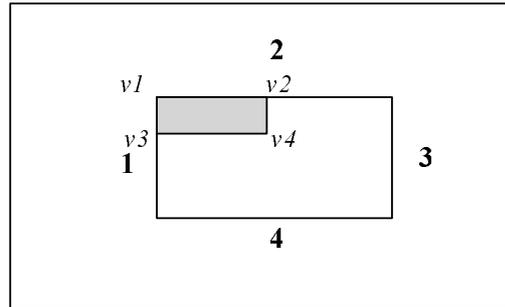


Figura 16. Local B,1-2

**c) Trazado de locales tipo D**

Para los locales tipo D también es necesario definir ambas dimensiones (alto y ancho del local), pero en este paso sólo se definirá una de ellas, la concerniente al lado exterior del local. Suponiendo  $m$  lado exterior de local  $j$ , se tiene la ecuación

$$d \text{ coordenada\_libre} = MAX\_coordenada\_libre / Nm$$

donde  $d \text{ coordenada\_libre} = dx$  si  $m$  es vertical (lados 1 ó 3),  $dy$  si  $m$  es horizontal (lados 2 ó 4)  $dx$  es ancho del local  $j$ ,  $dy$  alto del local  $j$ ,  $MAX\_coordenada\_libre = MAX\_X$  si  $dx$ ,  $MAX\_Y$  si  $dy$  y  $Nm$  el número de locales del lado exterior  $m$ .

Es decir, el alto o ancho del local será igual al lado exterior al que pertenece dividido entre el número de locales del mismo. Por ejemplo, para un local del lado exterior 1 (Figura 17a)  $dy$  es la longitud máxima vertical partido el número de locales del lado exterior 1. La dimensión restante se determina en el paso d).

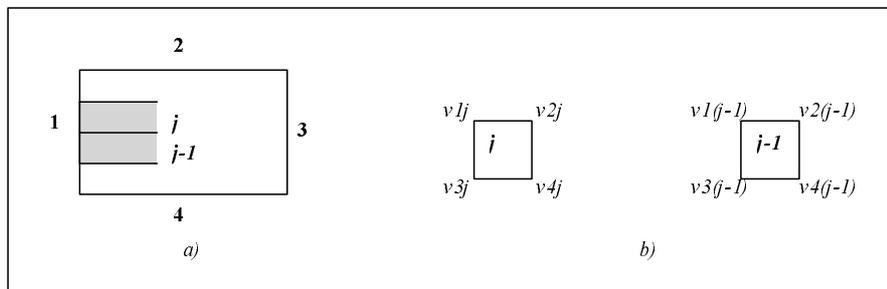


Figura 17. a) Local D,1; b) Denominación de vértices

En la Figura 17a se puede observar que  $j$  es el local de tipo D, con lado exterior 1, a trazar sobre la planta, y que el local  $j - 1$  es el local anterior (de cualquier tipo) previamente trazado.

Teniendo en cuenta, además, la denominación de los vértices tal y como se muestra en la Figura 17b y según la metodología anteriormente expuesta, se obtiene

$$v1j \cdot x = 0 \cdot 0$$

$$v1j \cdot y = v1(j-1) \cdot x - (MAX\_X/N1) \rightarrow v1j \cdot y = MAX\_Y - (i * (MAX\_X/N1))$$

siendo  $i$  la posición que ocupa el local dentro del lado exterior al que pertenece, numerando de abajo hacia arriba.

$$v2j \cdot y = v1j \cdot y$$

$$v3j \cdot x = v1j \cdot x$$

$$v3j \cdot y = v1(j-1) \cdot y$$

$$v4j \cdot y = v3j \cdot y$$

#### d) Generación de raíces

A continuación se generan cinco plantas que serán las raíces a partir de las cuales se formarán los cinco árboles estado-acción en la búsqueda (colocación de locales interiores). Estas cinco raíces se determinan en función de cuál de los lados exteriores ocupa el espacio interior de la planta. La ocupación de este espacio se realiza para facilitar la colocación de los locales interiores.

Para la generación de la raíz del primer árbol:

1. Se calcula el lado exterior de camino mínimo, que es aquél separado de su opuesto por un menor número de locales.
2. Para los locales de lado exterior el de camino mínimo y para los locales del lado exterior opuesto al de camino mínimo se divide la dimensión total entre 2:

$$d \text{ coordenada\_libre} = MAX\_coordenada\_libre/2$$

3. Para el resto de locales se opera igual que para la dimensión libre de los locales tipo A, de forma que ocupen el menor espacio de entre los dos posibles. De ahí que se divida entre el máximo de sus lados exteriores consecutivos (anterior  $m$  y posterior  $n$ ).

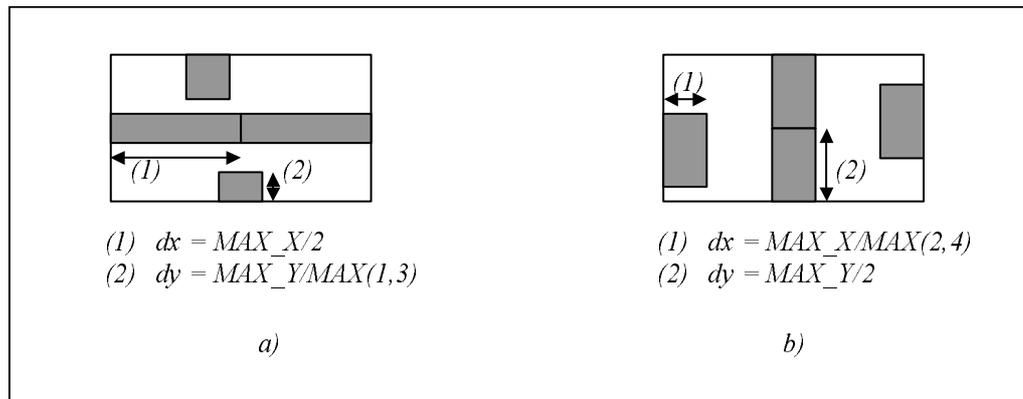
$$d \text{ coordenada\_libre} = MAX\_coordenada\_libre/MAX(Nm, Nn)$$

Es decir, los locales del lado exterior de camino mínimo y los de su opuesto ocupan el espacio interior de la planta.

De las ecuaciones anteriores se tiene  $coordenada\_libre = y$  si lado exterior de camino mínimo horizontal (2 ó 4),  $x$  si lado exterior de camino mínimo vertical (1 ó 3). Por ejemplo, como se particulariza para el lado exterior de camino mínimo 1, los locales de éste y del lado exterior 3 ocuparán el espacio interior de la planta (Figura 18a). Si el lado exterior de camino mínimo es 2, entonces los locales de éste y del lado exterior 4 ocuparán el espacio interior de la planta, como se observa en la Figura 18b.

Para la generación de la raíz del segundo árbol se pretende que los locales tipo D del lado exterior de camino mínimo ocupen el espacio interior de la planta. Así, suponiendo  $m$  lado exterior de camino mínimo de local  $j$  y  $n, l$  lados exteriores consecutivos a  $m$ , tal como se ha indicado anteriormente

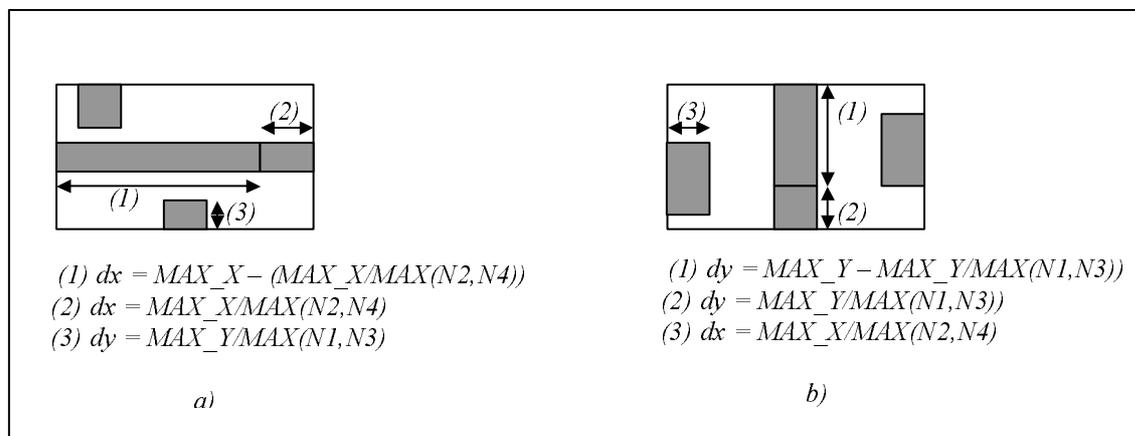
$$d \text{ coordenada\_libre} = MAX\_coordenada\_libre - (MAX\_coordenada\_libre/MAX(Nn, Nl))$$



**Figura 18.** Generación de la primera raíz: a) si lado exterior de camino mínimo es 2 ó 4; b) si lado exterior de camino mínimo es 1 ó 3

Es decir, se le da la dimensión completa menos la parte correspondiente a los locales del lado exterior opuesto. Para el resto de locales se opera de la forma usual dándole la menor dimensión (Figura 19). O sea,, suponiendo lado exterior distinto de  $m$  ( $n, l$  opuesto de  $m$ )

$$d \text{ coordenada\_libre} = MAX\_coordenada\_libre / MAX(Nm, Np)$$



**Figura 19.** Generación de la primera raíz: a) si lado exterior de camino mínimo es 1; b) si lado exterior de camino mínimo es 2

La tercera, cuarta y quinta raíz se consiguen según las fórmulas seguidas para la generación de la segunda, tomando como referencia los siguientes al camino mínimo sucesivamente. Así, para la tercera ocuparán el espacio interior los locales del lado exterior siguiente al de camino mínimo  $Sig(m)$ , para la cuarta el siguiente al lado tomado para la tercera y para la quinta el siguiente al lado tomado para la cuarta.

Suponiendo  $m$  el lado exterior de camino mínimo, entonces:

- tercer árbol: lado exterior referencia =  $Sig(m)$ ,
- cuarto árbol: lado exterior referencia =  $Sig(Sig(m))$ ,
- quinto árbol: lado exterior referencia =  $Sig(Sig(Sig(m)))$ .

### e) Detección y corrección de huecos y solapamientos

En el trazado de locales tipo B y tipo D se puede haber provocado algún hueco o solapamiento entre locales en la planta que es necesario corregir. Para ello se siguen los siguientes procesos:

#### *Detección de huecos entre locales exteriores*

Para poder detectar los huecos se debe:

1. Estudiar la consecutividad de los vértices exteriores de los locales.
2. Si se encuentra algún vértice exterior que pertenece a un único local y no es vértice de la planta, entonces se ha encontrado un hueco que debe corregirse.
3. Para ello debe aumentarse la dimensión correspondiente al local del vértice detectado hasta alcanzar un lado del siguiente local.

#### *Detección de solapamientos entre locales exteriores*

La detección de solapamientos sólo puede darse entre locales tipo D con locales tipo B, en este caso:

1. Se estudia la colocación de los vértices interiores de cada local.
2. Si existe algún vértice interior que cae dentro del área de otro local, entonces hay solapamiento.
3. Se corrige disminuyendo la dimensión del local hasta conseguir salir del área del otro local.

### Trazado de locales interiores

El principio básico para el trazado de los locales interiores o locales tipo E es el siguiente: se tratará de “colocar los locales interiores en locales exteriores tipo D dentro de los locales interiores previamente trazados”, siempre que no sean locales verticales al local interior a colocar. Ésta es la razón por la que se ha ocupado el espacio interior de la planta con los locales tipo D en la generación de raíces.

El algoritmo consta a su vez de tres procesos:

- a) búsqueda que va generando los distintos nodos del árbol,
- b) corrección que opera sobre los nodos generados en la búsqueda,
- c) evaluación de cada uno de los nodos. Poda y retroceso (*backtracking*) cuando corresponda.

#### a) Búsqueda

El proceso de búsqueda empleado va generando los diferentes caminos de cada árbol a partir de las cinco raíces generadas anteriormente, es decir, se obtienen cinco árboles estado-acción realizando una búsqueda exhaustiva.

Lo que se hace es aplicar recursividad sobre la lista de locales interiores a colocar, de modo que para cada local de la lista se llevan a cabo los pasos indicados en el diagrama de flujo de la Figura 20.

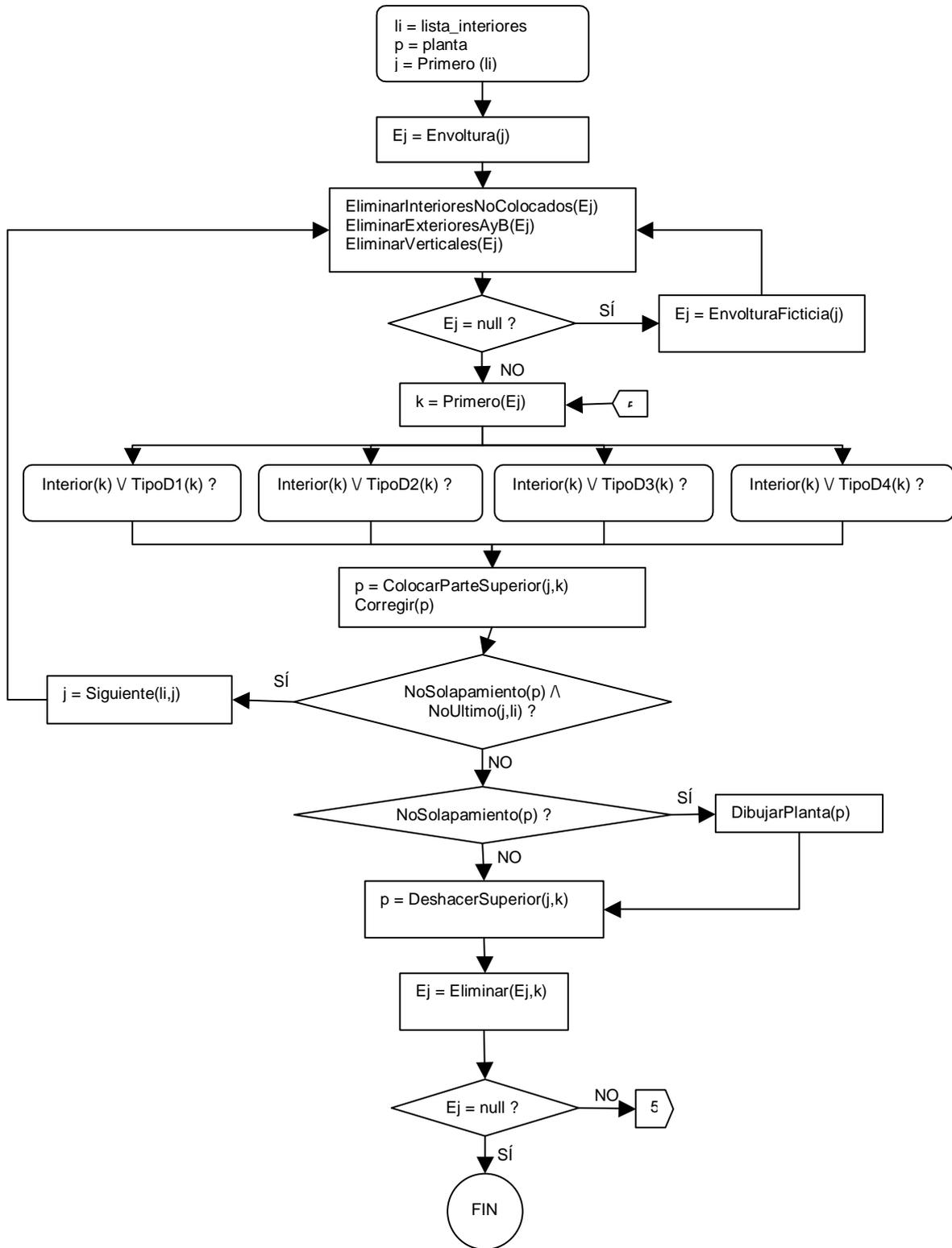
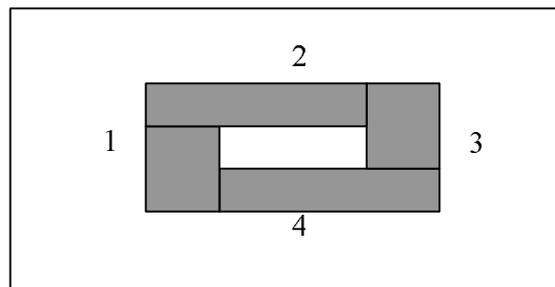


Figura 20. Diagrama de flujo. Algoritmo de colocación de locales interiores

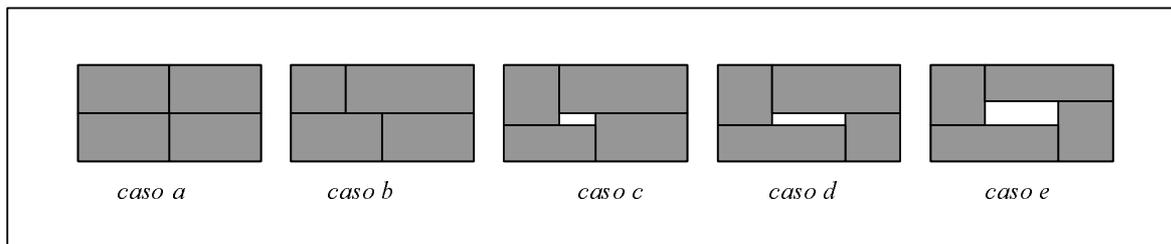
La raíz será la planta con el trazado de los locales exteriores, ocupando parte de ellos el espacio interior. Los nodos intermedios se van generando a medida que se colocan los locales interiores, por lo que cada nivel intermedio del árbol se corresponde con la colocación de un local interior en la planta. Por último, los nodos finales de nivel  $n$  son las soluciones finales obtenidas tras la corrección de distribución definitiva, con todos los locales ya trazados, de tal forma que cumpla con el requisito de entrada (adyacencias entre locales). Existe una excepción a la hora de realizar la búsqueda y colocar el primer local interior, que ocurre cuando sólo existen locales exteriores de tipo D en la planta (Figura 21).



**Figura 21.** Caso de excepción

La raíz con los locales exteriores que se genera es la planta dividida en cuatro partes ocupando todo el espacio (Figura 22a). Para resolver esto se hace un hueco interior rectangular sobre el que se colocará el primer local interior. A partir de aquí el procedimiento de búsqueda se normaliza. El hueco interior se logra:

- disminuyendo el área de la esquina 1-2 y aumentando la 2-3 (caso b),
- disminuyendo el área de la esquina 2-3 y aumentando la 3-4 (caso c),
- disminuyendo el área de la esquina 3-4 y aumentando la 4-1 (caso d),
- disminuyendo el área de la esquina 4-1 y aumentando la 1-2 (caso e).



**Figura 22.** Proceso de corrección del proceso indicado en la Figura 21

## b) Corrección

El algoritmo de corrección trata de encaminar las soluciones potenciales hacia una solución final de modo que cumpla el mayor número de adyacencias de entrada entre los locales ya colocados.

De este modo será necesario, por un lado, hacer que locales que NO deben ser adyacentes en la planta y se han trazado como adyacentes dejen de serlo. Para ello será necesario disminuir una dimensión de uno de los locales implicados. En este caso se va a procurar modificar siempre que se pueda el local objeto de estudio (local en gris en las Tablas I y II).

En la Tabla I se tienen aquellos casos en los que es necesario disminuir la dimensión  $x$ , es decir, el ancho del local. En la Tabla II, por otra parte, se muestran los casos en los que es necesario reducir el alto del local (coordenada  $y$ ) para cumplir las adyacencias de entrada.

Problema	Solución

**Tabla I.** Casos en que se reduce la dimensión  $x$  del local objeto de estudio

Problema	Solución

**Tabla II.** Casos en que se reduce la dimensión  $y$  del local objeto de estudio

Por otro lado, será necesario que locales que deben ser adyacentes, se hayan trazado como no adyacentes y haya que corregirlos. Para ello se debe aumentar la dimensión o dimensi nes, en algunos casos, del local que no es objeto de estudio (en blanco en la Tablas III y IV, en este caso, para evitar caer en un bucle infinito).

Los ejemplos de la Tabla III muestran casos en los que sólo es necesario modificar una dimensión (alto o ancho del local).

Problema	Solución

**Tabla III.** Casos en que se modifica una sola dimensión del local adyacente

En la Tabla IV se muestran ejemplos en los que deben aumentar las dos dimensi nes (alto y ancho del local). Cuando existen dos alternativas, a la hora de corregir se opta por la primera de ellas.

Problema	Solución

**Tabla IV.** Casos en que se aumentan las dos dimensi nes del local adyacente

### c) Condición de evaluación: poda

La evaluación que se aplica después de la corrección parcial de cada nodo intermedio consiste en podar la rama y retroceder en la búsqueda un nivel o en caso contrario continuar.

Es decir, en el algoritmo para el trazado de locales interiores se genera cada nodo intermedio con la colocación de un local interior, se corrige dicho nodo para que vaya cumpliendo las adyacencias de entrada, y si durante este proceso se solapa por completo algún local, se poda y se sigue por otra rama. En caso contrario se continúa por esta rama hasta encontrar una solución final. Se obtienen así cinco espacios de soluciones formados por los nodos hoja de los cinco árboles estado-acción.

## CONCLUSIONES

El proyecto de automatizar el proceso de obtención de trazados arquitectónicos de edificios en planta para poder obtener potentes herramientas de ordenador es difícil de llevar a cabo debido a la complejidad del mismo. Sin embargo, ha quedado demostrado que, ayudados por la teoría de grafos y el sistema de búsqueda heurística, se pueden llegar a obtener diferentes soluciones válidas para un problema de entrada.

El algoritmo para el trazado automático de esquemas adimensionales en planta presentado en este documento es una primera aproximación para conseguir automatizar el proceso de diseño de planos de edificios en planta a partir de un grafo de conexiones.

Por un lado, el algoritmo logra filtrar y encaminar la búsqueda de forma que no sea una búsqueda aleatoria o de "fuerza bruta", sino que sea una búsqueda guiada por las adyacencias entre locales dadas en el grafo inicial. Esto hace que sea un algoritmo más potente o más fuerte dentro de los algoritmos heurísticos vistos hasta el momento, sin alejarse de ser un algoritmo general.

El algoritmo propuesto como solución al problema de generar trazados adimensionales de plantas arquitectónicas es, por tanto, un algoritmo potente y bastante general, a pesar de que se hace un refinamiento exhaustivo en la búsqueda, pero no está probado que sea válido para cualquier problema inicial que sirva como entrada a los pasos previos. A pesar de esto, deja abierto un camino optimista para retomar los métodos heurísticos como solución al problema arquitectónico.

## REFERENCIAS

- 1 P.H. Levin, "Use of graphs to decide optimum layout of buildings", *Archit. J.*, (1966).
- 2 C.M. Eastman, "Automated space planning", *Architectural Intelligence*, Vol. 4, pp. 41-64, (1973).
- 3 E. Shaviv y D. Gali, "A model for space allocation in complex buildings: an approach", *Building Industrial*, pp. 493-518, Vol. 7, (1974).
- 4 C.M. Eastman, "Representations for space planning", *Communications of the ACM*, pp. 242-250, Vol. 13, (1970).
- 5 W. Mitchell, C.V. Steadman y R.S. Liggett, "Synthesis and optimisation of small rectangular floor plans", *Environment and Planning B.*, Vol. 3, (1976).
- 6 J.P. Steadman, "*Architectural Morphology*", Pion Ltd., Londres, (1983).
- 7 U. Flemming, "Wall representations or rectangular dissections and their use in automated space allocation", *Environment and Planning B.*, Vol. 5, (1978).

- 8 J.J. Sendra, “Generación y optimización automática de esquemas de distribución de edificios en planta”, Tesis doctoral, ETS Arquitectura, Universidad de Sevilla, (1984).
- 9 C.H. Earl y L.J. March, “Architectural applications of graph theory”, “*Applications of Graph Theory*”, Wilson y Beinek (Eds.), Academic Press, London, (1979).
- 10 P. Ungar, “On diagrams representing maps”, *J. London Math. Soc.*, Vol. **28**, (1953).
- 11 J. Roth, R. Hashimshony y A. Wachman, “Turning a graph into rectangular floor plan”, *Building and Environment*, Vol. **17**, pp. 163–173, (1982).
- 12 J. Roth y R. Hashimshony, “Algorithms in graph theory and their use for solve problems in architectural design”, *Computer Aided Design*, Vol. **20**, pp. 373–381, (1988).
- 13 J. Magiera, “Exterior partitions of a rectangle into rectangles and their graphs”, *Graph Theory Lagow 1981 proceedings*, Borowiecki *et al.*, (ed.), Springer Verlag, Berlín, pp. 125–130, (1981).
- 14 A. Schwarz, D.M. Berry y E. Shabib, “The use of automatic building design system”, *Computer Aided Design*, Vol. **26**, N° 10, pp. 747–761, (1994).
- 15 L.R. Fould, “Graph Theory Applications”, Springer-Verlag, (1992).
- 16 G. Chartand y O.R. Oellermann, “Applied and algorithmic graph theory”, McGraw-Hill, (1993).
- 17 F. Harary, “Graph theory”, Narosa Publishing House, New Delhi, (1999).
- 18 W.K. Balacrishnan, “Graph Theory”, *Schaum’s Outline Series*, (1997).
- 19 A. Recuero, O. Río y M. Álvarez, “Heuristic method to check the realisability of a graph into a rectangular plan”, *Advances in Engineering Software*, Vol. **31**, (2000).
- 20 A. Recuero, M. Álvarez y O. Río, “Grafos en el proyecto arquitectónico. Partición de un rectángulo en rectángulos”, *Revista Internacioanl de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **12**, N° 2, (1996).
- 21 F. Preparata y M.I. Shames, “*Computational geometry: an introduction*”, Springer Verlag, (1985).
- 22 G. Brassard y P. Bratley, “*Algorithmics. Theory and practice*”, Prentice-Hall International, Inc., (1986).
- 23 H. Edelsbrunner, “*Algorithms in combinatorial geometry*”, Springer Verlag, (1987).
- 24 J. O’Rourke, “*Art gallery theorems and algorithms*”, Oxford Univ. Press, (1987).
- 25 S. Skiena, “*Implementing Discrete Mathematics*”, Addison-Wesley, (1990).
- 26 M. de Berg, M. van Krebeld, M. Overmans y O. Schwarzkopf, “*Computational geometry, Algorithms and applications*”, Springer Verlag, (1997).
- 27 T. Cormenm, C. Leiserson y R. Rivest, “*Introduction to Algorithms*”, MIT Press, (1990).
- 28 W.H. Press *et al.*, “*Numerical Recipes in C*”, Cambridge University Press, (1992).
- 29 J. O’Rourke, “*Computational Geometry in C*”, Oxford University Press, (1994).
- 30 M.A. Waiss, “*Estructuras de Datos y Algoritmos*”, Addison Wesley, (1995).
- 31 B.W. Kernighan y D.M. Ritchie, “*El lenguaje de programación C*”, 2ª edición, (1991).
- 32 G.E. Sobelman y D.E. Krekelberg “*Técnicas avanzadas en C. Desarrollo de aplicaciones*”, Anaya, (1983).
- 33 M. Waite, S. Prata y D. Martín, “*Programación en C. Introducción y conceptos avanzados*”, 2ª edición, Anaya, (1984).
- 34 U. Manber, “*Introduction to algorithms - A creative approach*”, Addison Wesley, (1989).