

# 2

Distribución en planta

## 2. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.

### 2.1. Introducción

En un mercado dominado por la competencia y la demanda, que exige gran variedad de productos con ciclos de vida cada vez más cortos, las empresas manufactureras tratan de adaptar sus procesos de fabricación implementando sistemas flexibles que permitan hacer frente a la incertidumbre que esta situación genera. Lograr la eficiencia y la flexibilidad demandada pasa necesariamente por una correcta ordenación de los medios productivos que permita, no sólo hacer frente con éxito a las situaciones actuales, sino también, a posibles escenarios futuros.

Un sistema productivo puede asimilarse a un proceso de transformación que convierte una serie de insumos en un determinado bien o servicio. Dicho proceso de transformación comprende un conjunto de operaciones diversas, tanto de tipo productivo sobre los insumos, materiales y productos (tratamiento, transformación, almacenamiento, inspección...), como de gestión de la información asociada al propio proceso (toma de decisiones, control de la producción, planificación, dirección...). La *Dirección de Operaciones* se puede definir como el diseño, la gestión del funcionamiento y la mejora de los sistemas de producción que crean los bienes o servicios de la compañía.

Los problemas que debe afrontar la *Dirección de Operaciones* pueden agruparse en dos categorías [Lario Esteban, 93]<sup>2</sup>: las relacionadas con el *Diseño del Sistema Productivo*, y las relacionadas con la *Gestión del Sistema Productivo*.

El Diseño del Sistema Productivo aborda:

- el diseño del producto (o servicio);
- la planificación de las capacidades productivas requeridas;
- la selección del equipo y el proceso;
- la localización geográfica de las unidades productivas y logísticas;
- la distribución en planta de los medios de producción;
- la selección de proveedores;
- la diseño de los sistemas de distribución;
- la definición del sistema de aseguramiento de la calidad;
- la selección de las tecnologías de información;
- el establecimiento de sistemas de control del sistema productivo;

---

<sup>2</sup> Otro criterio de agrupación muy extendido es en los tres niveles básicos de decisión: decisiones estratégicas, tácticas y operativas.

- y el estudio del trabajo.

Las decisiones relacionadas con la Gestión de los Sistemas Productivos son del tipo: previsión de la demanda, planificación de producción y compras, gestión de inventarios, programación y control de la producción, gestión del aprovisionamiento, gestión de la distribución, definición de los sistemas de mantenimiento de renovación de equipos, etc.

El presente trabajo se centrará sobre una de las decisiones que debe tomar el planificador durante el diseño del sistema productivo: la distribución en planta de los medios productivos. Se hace necesario resaltar que la distribución en planta no es un subproblema aislado dentro del proceso de diseño de la actividad productiva; como se expondrá más adelante, existe una clara interrelación entre la distribución y el resto de decisiones de la dirección de operaciones, tanto en su vertiente de diseño del sistema como en la de la gestión del mismo.

Tompkins y White [Tompkins et al., 84] dividieron la planificación de una actividad industrial (a la que se llamará proyecto de actividad industrial) en cinco fases (Figura 2.1). Tras la selección del producto a fabricar y del sistema productivo, y de haber dimensionado el proceso y el volumen de producción, se procede a la localización o ubicación de la planta industrial seleccionando la zona de actuación, el suelo industrial y la parcela, en base a diferentes criterios (puntos de abastecimiento de materias primas, situación de los mercados, sistemas de comunicación, etc.). Tras esto se realiza una distribución de conjunto de la planta que servirá de base para la distribución detallada y la elaboración del proyecto de ejecución. En una última fase se procederá a ejecutar el proyecto.

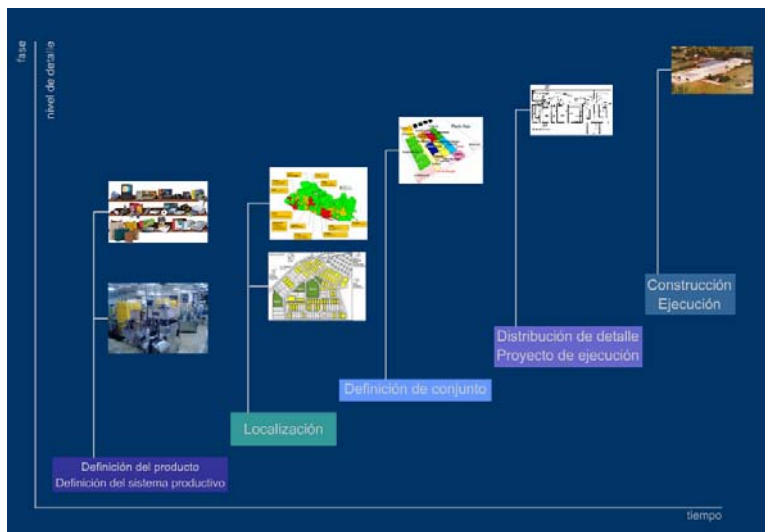


Figura 2.1: Fases de la planificación de una actividad industrial.

En el esquema habitual, la distribución en planta o layout, parte de considerar el número de actividades a realizar en el proceso productivo, el área requerida para el correcto desarrollo de dichas actividades, y las interrelaciones existentes entre ellas (flujos de materiales, necesidades de proximidad o alejamiento, etc.). A partir de dichos criterios se

obtiene una distribución ideal en la que quedan definidas la ordenación de actividades, la situación relativa entre ellas en el espacio de la planta y la forma de dicha planta (en el caso de que ésta no esté definida a priori). Basándose en dicha distribución ideal, y en una fase del proyecto de mayor nivel de detalle, se sintetiza la distribución real que será la que finalmente se lleve a la práctica. Para ello, se consideran factores como el aprovechamiento del espacio cúbico, los sistemas de mantenimiento y almacenaje o las técnicas constructivas disponibles. Esta distribución real determinará la tipología estructural escogida para la planta, el número y disposición de las aberturas, la altura de pilar y en definitiva la morfología de la nave, si es que ésta no existe y no está definida previamente.

Muther [Muther et al., 79] plantea con el método SPIF (Systematic Planning of Industrial Facilities) la planta industrial como un sistema compuesto por cinco subsistemas físicos interrelacionados entre ellos y con el entorno (Figura 2.2).

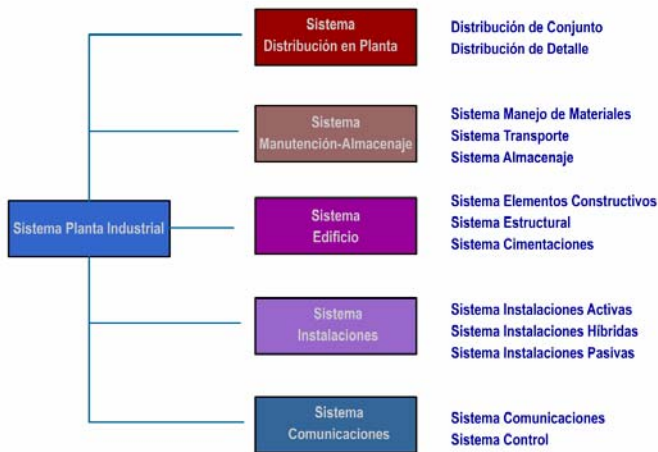


Figura 2.2: Sistema planta industrial y subsistemas que lo conforman.

Es el subsistema **distribución en planta** el que determina la ordenación de los medios productivos. Realizar dicha ordenación de manera eficiente no es un problema trivial debido al gran número de factores a considerar; una planta industrial es un sistema complejo en el que interactúan máquinas, materiales y hombres sirviéndose de un conjunto de instalaciones (sistemas de mantenimiento, almacenaje, servicios auxiliares, etc.). Es evidente que la forma de ordenar los medios productivos influye en la concepción del edificio industrial, en los medios de mantenimiento y almacenamiento a emplear, en las instalaciones y en los sistemas de comunicación. Respecto al edificio industrial, la distribución en planta condiciona los espacios y por tanto influye sobre la configuración arquitectónica del mismo (excepción hecha de aquellas distribuciones realizadas sobre plantas ya construidas o que deban adecuarse a las condiciones pre-existent).

Además de la complejidad de las relaciones del subsistema distribución en planta con el resto de subsistemas y con el entorno, la dificultad fundamental para obtener distribuciones flexibles y eficientes de los medios productivos, es la necesidad de contemplar y satisfacer

múltiples criterios. Como se expondrá posteriormente, el problema que se aborda posee un marcado carácter multicriterio, siendo simplista cualquier intento de abordarlo desde una perspectiva monocriterio.

La obtención de una distribución en planta adecuada a las necesidades de la empresa debe ser uno de los objetivos fundamentales de la arquitectura industrial. Mientras que una correcta ordenación de los medios de producción de la empresa, constituye para ésta una importante fuente de ventajas competitivas al tener incidencia directa sobre el coste de los productos fabricados, los tiempos de fabricación, el consumo de recursos energéticos, y sobre la capacidad de adaptación ante los cambios en la demanda, una distribución en planta incorrecta, constituye un grave problema que dificulta los procesos de fabricación, aumenta los costos de producción y que puede, llegado el momento, dificultar la subsistencia de la empresa.

*“La distribución en planta es un fundamento de la industria. Determina la eficiencia y, en algunos casos, la supervivencia de una empresa” [Muther, 81].*

Así pues, es absolutamente justificable la necesidad de un estudio detallado de las necesidades de la planta, de las características de su proceso productivo, de las características del mercado, y en general de todos los aspectos necesarios para desarrollar una correcta distribución en planta. A partir de los resultados de estos estudios debe obtenerse una distribución a largo plazo que traté de evitar modificaciones o redistribuciones que representan importantes costes, no sólo económicos sino también temporales, o bien, distribuciones fácilmente adaptables a las variaciones en la demanda del producto fabricado, o de los procesos productivos. Esta última aproximación, que contempla el problema de la distribución en planta desde una perspectiva temporal de condiciones variables [Hitchings, 70], en la que se trata de obtener distribuciones óptimas desde el punto de vista de la adaptabilidad a nuevas situaciones, es denominada *problema dinámico de distribución en planta*<sup>3</sup>. Este tipo de planteamiento fue introducido inicialmente por Rosenblatt [Rosenblatt, 86] y fue seguido posteriormente por multitud de autores (por ejemplo: [Balakrishnan et al., 92; Conway et al., 94; Lacksonen, 97; Baykasoglu et al., 01]).

El problema de la distribución en planta, sobre todo en la fase de distribución de conjunto, ha sido abordado por múltiples autores desde diversas perspectivas, empleando técnicas procedentes de otros ámbitos o desarrollando herramientas específicas para ello. En cualquier caso el problema está lejos de ser completamente resuelto, puesto que las soluciones obtenidas con los métodos existentes no son trasladables a una distribución detallada directamente implementable. El problema, en caso de abordarlo con cierto rigor, es intrínsecamente complejo debido a su carácter multicriterio, y a la naturaleza cuadrática de la función objetivo resultante de la formulación matemática del mismo. Por otra parte, la modelización del comportamiento de la planta y de las interacciones entre las diferentes actividades, la selección de los criterios a considerar y la calidad de la información de la que se dispone, introducen necesariamente inexactitudes que afectan a la inmediatez con que la distribución obtenida se puede trasladar a las siguientes fases de la implantación.

---

<sup>3</sup> En ocasiones, y en contraposición a la denominación inglesa “*dynamic facility layout problem*” (DFLP), al problema tradicional, que no consideran las posibles variaciones de las condiciones actuales para la generación de las distribuciones, se le denomina “*static facility layout problem*” (SFLP)

La falta de calidad geométrica de las soluciones obtenidas con los métodos existentes es quizá la mayor de las dificultades para una implementación directa. La consecuencia de la falta de control geométrico sobre los espacios asignados a cada una de las diferentes actividades, provoca que deban realizarse reajustes manuales que transformen la solución de conjunto obtenida, en una aplicable en la realidad.

## **2.2. Objetivos de la distribución en planta y definiciones del problema**

Como ya se dicho, una distribución en planta adecuada proporciona beneficios a la empresa que se traducen en un aumento de la eficiencia y por lo tanto de la competitividad. Esto es más así con la introducción de conceptos de fabricación recientes, como los sistemas de fabricación flexibles (FMS), la fabricación integrada por ordenador (CIM), o los sistemas de suministro de material Just-In-Time (JIT). Sea cual sea el sistema productivo, una correcta distribución en planta permite reducir los requerimientos de espacio y los desplazamientos de material, disminuye el volumen de trabajo en proceso y mejora el control de materiales y producto acabado.

Queda establecida, pues, la necesidad de una correcta distribución de las actividades productivas y los beneficios de ello esperables. Para lograr dichos beneficios es necesario que la solución obtenida cumpla con determinados objetivos.

Moore [Moore, 62] establece siete objetivos básicos a cumplir por la distribución en planta:

- simplificar al máximo el proceso productivo;
- minimizar los costes de manejo de materiales;
- tratar de disminuir la cantidad de trabajo en curso;
- aprovechar el espacio de la manera más efectiva posible;
- aumentar la satisfacción del operario y procurar la seguridad en el trabajo;
- evitar inversiones de capital innecesarias, y;
- aumentar el rendimiento de los operarios estimulándolos convenientemente

De manera general, Moore define la distribución en planta óptima, como aquella que proporciona la máxima satisfacción a todas las partes que se ven involucradas en el proceso de implantación.

Por su parte, Muther define el objetivo perseguido como lograr la mejor ordenación desde el punto de vista económico, de las áreas de trabajo y del equipo, siendo ésta además segura y satisfactoria para los empleados. Para este autor una buena distribución debe traducirse necesariamente en una disminución de los costes de fabricación, y para lograr esto, es necesario plantearse los siguientes objetivos durante su definición:

- reducir los riesgos para la salud y velar por la seguridad de los trabajadores;
- elevar la moral y la satisfacción del operario;

- incrementar la producción;
- disminuir los retrasos en la producción;
- minimizar las necesidades de espacio (tanto el destinado a producción como el necesario para almacenamiento o servicios);
- disminuir el tránsito de materiales;
- lograr un uso eficiente de la maquinaria, la mano de obra y los servicios;
- disminuir los tiempos de fabricación y la cantidad de material en proceso;
- reducir el trabajo administrativo y el trabajo indirecto en general;
- facilitar la supervisión;
- disminuir la confusión y la congestión;
- disminuir el riesgo para el material o su calidad;
- facilitar los ajustes o los cambios en el proceso;
- facilitar labores de mantenimiento, condiciones sanitarias, control de costes, y en general otros objetivos diversos.

Muther [Muther, 81] condensa la lista de objetivos anteriores en los siguientes seis objetivos básicos:

1. Integración conjunta de todos los factores que afectan a la distribución.
2. Movimiento del material según distancias mínimas.
3. Circulación del trabajo a través de la planta.
4. Utilización efectiva de todo el espacio.
5. Satisfacción y seguridad de los trabajadores.
6. Flexibilidad en la ordenación que facilite ajustes posteriores.

Autores más recientes, como por ejemplo Dowlatahahi [Dowlatahahi, 94], proporcionan listas de objetivos similares a los ya expuestos, haciendo especial hincapié en la minimización de los costes de operación y de mantenimiento, de los riesgos y las molestias; en aumentar el uso efectivo del espacio, la flexibilidad de la organización y el cumplimiento de las diferentes normativas; en proporcionar a los empleados comodidad seguridad y confort; en facilitar el flujo de operaciones, la organización y la toma de decisiones; y sobre todo, en la necesidad de la flexibilidad de la distribución.

Este último aspecto, la flexibilidad, ha ido adquiriendo paulatinamente una mayor importancia pasando a ser un objetivo primordial. Se entenderá que una distribución es flexible si puede ser ajustada o reordenada en poco tiempo, con poco esfuerzo, y con poca penalización en el coste y en el rendimiento [Upton, 94], para adaptarse tanto a variaciones del entorno económico, social o tecnológico de la empresa, como a reajustes internos de la planta. Una distribución en planta flexible será capaz de responder con la máxima rapidez y el mínimo coste, a cambios como descubrimientos científicos, mejoras en las comunicaciones, avances de la tecnología, mejoras de los procesos productivos, variaciones

en la legislación medioambiental o laboral, demandas de nuevas tipologías de productos, etc. Según Upton, la flexibilidad es de carácter multidimensional y debe ser entendida desde diversos puntos de vista. Así, este autor habla de flexibilidad del producto, de determinación de itinerarios, de composición, funcional, de estado, de volumen, de programa, a largo plazo, a corto plazo, de expansión, de maquinaria, de mano de obra, de proceso, de instalaciones, o de modificaciones del diseño.

Conocidos los objetivos que, según diversos autores, debe cumplir una distribución adecuada de los medios de producción, es necesario proporcionar una definición del problema consistente en obtener dicha distribución. La revisión bibliográfica sobre el tema ofrece diferentes definiciones del problema de distribución en planta, que difieren únicamente en aspectos particulares del mismo (una profusa relación de definiciones del problema puede consultarse en [Kusiack et al., 87]).

*“La distribución en planta implica la coordinación física de los elementos industriales. Esta ordenación, ya practicada o en proyecto, incluye, tanto los espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento, trabajadores indirectos y todas las otras actividades o servicios, como el equipo de trabajo y el personal de taller.”* [Moore, 62]

*“La distribución en planta es el plan, o el acto de planificar, el ordenamiento óptimo de las actividades industriales, incluyendo personal, equipo, almacenes, sistemas de manutención de materiales, y todos los otros servicios anexos que sean necesarios para diseñar de la mejor manera posible la estructura que contenga estas actividades. [...] se trata de hallar una ordenación de las áreas de trabajo y del equipo que sea la más económica para llevar a cabo el proceso productivo, al mismo tiempo, que la más segura y satisfactoria para los operarios y para el entorno de la planta industrial [...] de modo que sea posible fabricar los productos con un coste suficientemente reducido para poder venderlos con un buen margen de beneficio en un mercado de competencia.”* [Muther, 81].

*“Los problemas de distribución en planta son un grupo de problemas de optimización consistentes en la partición de una región plana de dimensiones conocidas (generalmente rectangular) en departamentos de área conocida, de tal manera que se minimice el coste asociado con las interacciones previstas entre dichos departamentos. Éstos costes pueden deberse al transporte (incluyendo costes asociados con la construcción de los sistemas de manutención), o preferencias relativas a la adyacencia entre departamentos.”* [Tate et al., 95]

*“El problema de la distribución en planta consiste en determinar la distribución más eficiente de un número de departamentos indivisibles con requerimientos de área desigual en el interior de una instalación. El objetivo es minimizar los costes del transporte de materiales dentro de la planta considerando dos grupos de restricciones: los requerimientos de área y las restricciones de localización de los departamentos (no pueden solaparse, deben ser colocados en el interior de la planta, y algunas pueden necesitar una localización fija o no pueden ser colocados en regiones específicas).”* [Meller et al., 96c]

*“La distribución en planta consiste en resolver el problema de situar todos los componentes físicos que intervienen en un proceso de fabricación de modo que su comportamiento sea óptimo desde el mayor número de puntos de vista posibles, y es un problema que en todas las plantas industriales se ha de resolver”* [Gómez-Senent, 97].

*“El problema de la distribución en planta consiste en la disposición física de un número*



*dado de departamentos o máquinas con una configuración determinada. En el contexto de las empresas manufactureras, el objetivo es minimizar el coste del transporte de materiales requeridos entre los diferentes departamentos” [Mavridou et al., 97]*

*“El problema de la distribución en planta consiste en localizar la disposición óptima de un grupo de instalaciones sujetas a restricciones cualitativas o cuantitativas.” [Shayan et al., 04]*

Como se ha dicho, aunque las diferentes definiciones del problema lo abordan desde puntos de vista más o menos operativos, en general, en todas queda remarcado el carácter necesario, multifactorial y complejo del mismo.

## **2.2.1 Principios de la distribución en planta**

En el apartado anterior se han enumerado los objetivos que debe cumplir una distribución en planta según diversos autores. Según Muther, estos objetivos pueden resumirse y plantearse en forma de *principios*, sirviendo de base para establecer una metodología que permita abordar el problema de la distribución en planta de forma ordenada y sistemática [Muther, 81].

### **I. Principio de la integración de conjunto**

“la mejor distribución es la que integra a los operarios, los materiales, la maquinaria, las actividades, así como cualquier otro factor, de modo que resulte el compromiso mejor entre todas estas partes”.

### **II. Principio de la mínima distancia recorrida**

“en igualdad de condiciones, es siempre mejor la distribución que permite que la distancia a recorrer por el material entre operaciones será la más corta”.

### **III. Principio de la circulación o flujo de materiales**

“en igualdad de condiciones, es mejor aquella distribución que ordene las áreas de trabajo de modo que cada operación o proceso esté en el mismo orden o secuencia en que se tratan, elaboran, o montan los materiales”.

### **IV. Principio del espacio cúbico**

“la economía se obtiene utilizando de un modo efectivo todo el espacio disponible, tanto en vertical como en horizontal”.

### **V. Principio de la satisfacción y de la seguridad (confort)**

“en igualdad de condiciones, será siempre más efectiva la distribución que haga el trabajo más satisfactorio y seguro para los operarios, los materiales y la maquinaria”.

### **VI. Principio de la flexibilidad**

“en igualdad de condiciones, siempre será más efectiva la distribución que pueda ser ajustada o reordenada con menos costos o inconvenientes”.

Estos principios pueden servir de base para determinar los objetivos a cumplir durante la definición de la distribución en planta, y para medir el grado en que se ha logrado alcanzar dichos objetivos. No obstante, esta enumeración de principios fue realizada en 1981, y la

introducción de nuevos conceptos en los procesos de fabricación provoca que algunos de ellos hayan quedado desfasados.

### **2.3. La distribución en nueva planta frente a la reordenación de una planta existente**

El proyecto de implantación de una distribución en planta es un problema que no aparece únicamente en las plantas industriales de nueva creación. Durante el transcurso de la vida de una determinada planta, surgen cambios o desajustes que pueden hacer necesario desde reestructuraciones menores (reordenación de las actividades, cambios en los sistemas de manutención, cambios en cualquier tipo de servicio auxiliar...), hasta el traslado a una nueva instalación.

Un ejemplo del primer tipo sería la aparición de avances tecnológicos que pueden hacer necesaria la incorporación o sustitución de maquinaria en el proceso, lo cual da lugar a la generación de nuevas actividades o cambios en las áreas de trabajo de las actividades. Esto precisará de una nueva distribución de los diferentes elementos.

La necesidad de trasladar la actividad a una nueva planta se da cuando los problemas detectados son de una envergadura tal, que no pueden ser resueltos mediante modificaciones menores del actual sistema productivo.

Los distintos tipos de problemas de distribución en planta pueden clasificarse en función de la causa que determina su necesidad. Moore y Apple realizan una enumeración de posibles causas [Moore, 62; Apple, 77]:

- cambios en el diseño de los productos, aparición de nuevos productos o cambios en la demanda;
- equipos, maquinaria o actividades obsoletas;
- accidentes frecuentes;
- puestos de trabajo inadecuados para el personal (problemas ergonómicos, ruidos, temperaturas,...);
- cambios en la localización de los mercados;
- necesidad de reducir costes, etc.

Apple ofrece una recopilación de síntomas que pueden manifestar problemas que requieran de una reordenación o ajuste en la distribución en planta. Así, son síntomas significativos:

- que el recorrido de los productos sea excesivamente retorcido o que existan retrocesos en la circulación de los materiales (tanto materias primas como productos en curso o productos terminados);
- la existencia de pasillos retorcidos y distancias excesivas en los transportes;
- la falta de planificación de las operaciones y de coordinación entre los sistemas de

manutención y los procesos de producción;

- que las primeras operaciones estén alejadas de los centros de recepción o que las operaciones finales estén alejadas de los centros de expedición;
- que los puntos de almacenamiento estén dispersos o no definidos, con un exceso material o trabajo en curso;
- la falta o exceso de espacio de almacenaje o que exista material y desechos amontonados en lugares no adecuados;
- que el personal deba realizar excesivos desplazamientos y las actividades de producción representan el mínimo tiempo empleado por el operario;
- que exista falta de coordinación entre los medios de producción y los medios auxiliares de producción <sup>4</sup>;
- que la distribución no permita adaptarse a las diversas condiciones de producción.

Muther realiza una clasificación del problema de distribución en planta de acuerdo a su naturaleza planteando cuatro tipos fundamentales:

**Tipo 1:** *Proyecto de una planta completamente nueva.* Este caso se da fundamentalmente con la creación de la propia empresa, cuando ésta inicia la producción de un nuevo tipo de producto o cuando se expande trasladándose a un área nueva.

**Tipo 2:** *Expansión o traslado a una planta ya existente.* En este caso el proyectista debe afrontar el problema desde una perspectiva diferente; deberá adaptar una estructura organizativa, un proceso y unos medios productivos ya existentes a las características de un edificio industrial y unos servicios ya determinados.

**Tipo 3:** *Reordenación de una planta ya existente.* El proyectista se enfrenta ahora a las mismas restricciones existentes durante la generación de la distribución original: forma del edificio, dimensiones e instalaciones. En este caso se tratará de utilizar al máximo los elementos ya existentes, compatibilizándolos con los nuevos medios y métodos a introducir.

**Tipo 4:** *Ajustes menores en distribuciones ya existentes.* El proyectista debe tratar de resolver el problema sin cambiar de manera significativa la distribución de conjunto, interrumpiendo sólo lo imprescindible el proceso y realizando los ajustes mínimos necesarios. Este tipo de problema se da fundamentalmente cuando varían las condiciones de operación debido a variaciones en el diseño de las piezas producidas, a reajustes del volumen de producción o a cambios en la maquinaria o en los equipos, que en general pueden implicar un reajuste de las áreas de trabajo requeridas, del personal o del emplazamiento de la maquinaria y sistemas de manutención.

---

<sup>4</sup> Según la definición que de estos da Heredia en [De-Heredia, 81].

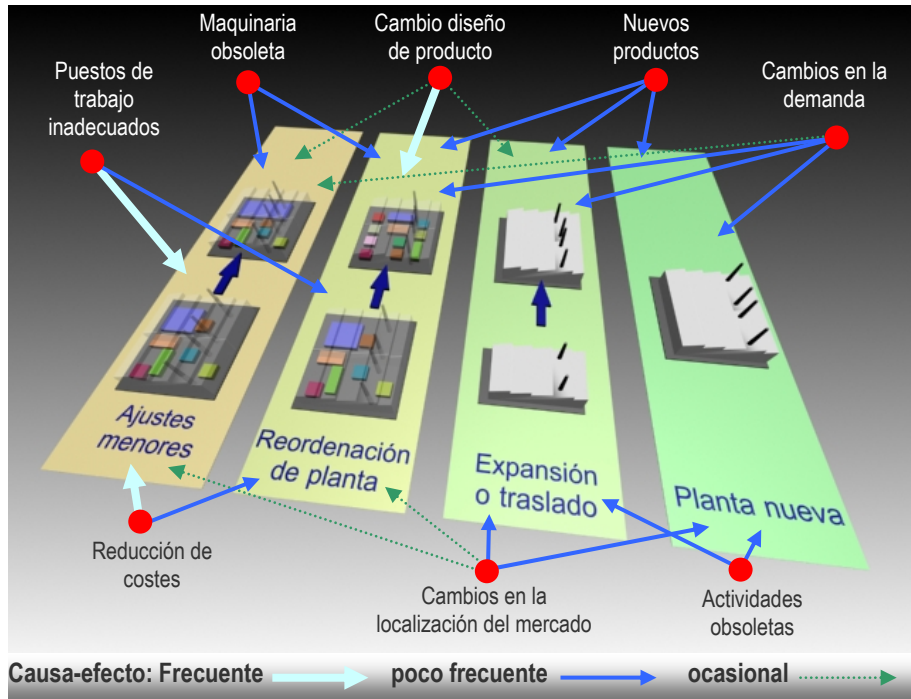























Figura 2.3: Tipos de problema de distribución y causas más frecuentes. Adaptado y ampliado de [Moore, 62]

## 2.4. Tipos básicos de distribución en planta de los medios de producción

La producción es el resultado de la acción combinada y coordinada de un conjunto de hombres que empleando maquinaria actúa sobre los materiales, modificando su forma, transformando sus características o combinándolos de diferentes maneras para convertirlos en un producto. El movimiento en los medios directos de producción es imprescindible para el desarrollo del proceso productivo. En algunos casos son los operarios los que se trasladarán a los puntos donde se realizan las diferentes operaciones; en otros casos es el material o incluso la maquinaria la que se desplaza. Las diferentes combinaciones de movimiento de los medios directos de producción pueden apreciarse en la Tabla 2.1

Desplazamiento	Ejemplo
  	Montaje de piezas pequeñas con maquinaria ligera.
  	Talleres mecánicos automatizados.
  	Construcción naval, construcción de grandes aviones, obras públicas...
  	Fabricación de utillaje en poca cantidad, instalación de piezas especiales...
  	Plantas de envasado, refinerías de petróleo, talleres de maquinaria...
  	Operarios compartiendo maquinaria ligera, maquinaria portátil...
  	Control de calidad, supervisión de procesos, ordenación de materiales...

### Leyenda

	Maquinaria en movimiento		Operarios en movimiento		Material en movimiento
	Maquinaria estática		Operarios estáticos		Material estático

Tabla 2.1: Movimiento de los medios directos de producción (ampliado de [Santamarina, 95]).

Considerando como criterio exclusivamente al tipo de movimiento de los medios directos de producción, existen tres tipos clásicos de distribución en planta:

- **Distribución por posición fija.**
- **Distribución en cadena, en serie, en línea o por producto.**
- **Distribución por proceso, por función o por secciones.**

Además del tipo de movimiento de los diferentes medios de producción, otro factor que puede afectar determinadamente al tipo de distribución adoptada es la clase de operación de producción que se realiza en la actividad industrial. Las tres clases de operaciones de producción fundamentales son:

- **Elaboración o fabricación:** las operaciones van encaminadas a cambiar la forma del material inicial para obtener el producto final (inyección de plásticos,

embutición de metales...).

- **Tratamiento:** para obtener el producto final las operaciones transforman las características del material de partida (transformación del acero, fabricación de graña de plástico...).
- **Montaje:** para obtener el producto final las operaciones unen unas piezas a otras, materiales sobre las piezas o sobre un material inicial o base (elaboración de calzado o montaje de automóviles).

Desde el punto de vista de su influencia sobre la determinación de la distribución en planta más adecuada para cada caso, las operaciones de elaboración y tratamiento pueden considerarse como una única actividad dada su similitud, así pues, los tres tipos clásicos de distribución en planta combinados con los dos modos de operación de producción, dan lugar a seis tipos de distribución en planta básicos.

Por otra parte, considerando que existen tipologías clásicas de distribución difícilmente compatibles con determinadas operaciones, el número de posibles tipologías de distribución disminuye. No es corriente que las operaciones de montaje adopten distribuciones por proceso, dado que la maquinaria para este tipo de operación suele ser ligera y de fácil desplazamiento. Por otra parte, las operaciones de elaboración y tratamiento no suelen emplear distribuciones en posición fija, puesto que la maquinaria suele desempeñar un papel importante en este proceso y no suele ser fácil moverla. De esta manera se reducen a cuatro las tipologías básicas de distribución en planta.

### 2.4.1 Distribución por posición fija

La distribución por posición fija se emplea fundamentalmente en proyectos de gran envergadura en los que el material permanece estático, mientras que tanto los operarios como la maquinaria y equipos se trasladan a los puntos de operación. El nombre, por tanto, hace referencia al carácter estático del material.



*Figura 2.4: Distribución por posición fija: ensamble de un avión Airbus A340/600 en la planta de Airbus en Toulouse (Francia).*

Generalmente se trata de grandes productos de los que se fabrican pocas unidades de manera discontinua en el tiempo. Ésta es la disposición habitualmente adoptada en los astilleros durante la fabricación de grandes barcos, en la fabricación de grandes aviones o motores, o en la construcción de obras publicas.

Este tipo de distribución suele hacer necesaria una minuciosa planificación de las actividades a desarrollar, considerando la imposibilidad de movimiento del producto en proceso de fabricación y el gran tamaño de la maquinaria que suele ser empleada.

## 2.4.2 Distribución por proceso, por funciones, por secciones o por talleres.

Este tipo de distribución se escoge habitualmente cuando la producción se organiza por lotes. Ejemplo de esto serían la fabricación de muebles, la reparación de vehículos, la fabricación de hilados o los talleres de mantenimiento. En esta distribución las operaciones de un mismo proceso o tipo de proceso están agrupadas en una misma área junto con los operarios que las desempeñan. Esta agrupación da lugar a “talleres” en los que se realiza determinado tipo de operaciones sobre los materiales, que van recorriendo los diferentes talleres en función de la secuencia de operaciones necesaria. La secuencia requerida por cada tipo de producto fabricado suele ser diferente, por lo que un número elevado de productos distintos crea una gran diversidad de flujos de materiales entre talleres.

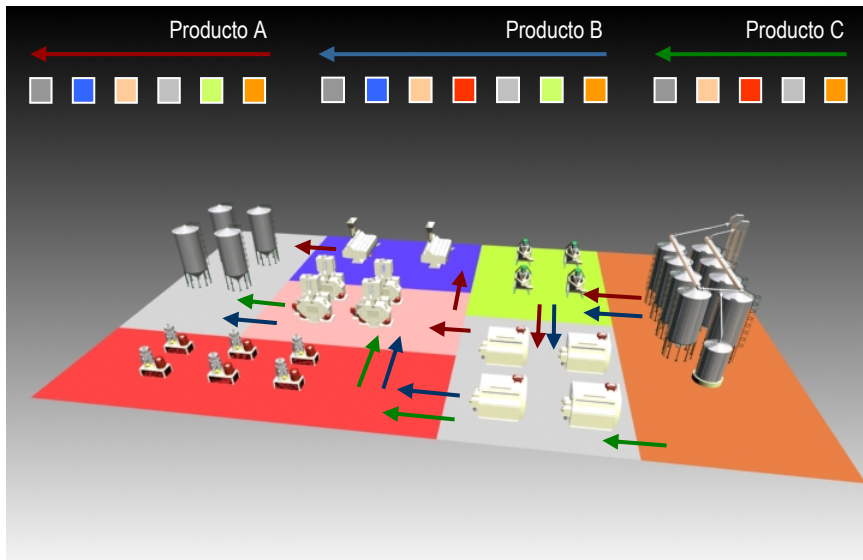


Figura 2.5: Distribución en planta por proceso.

La distribución por proceso, frente a otros tipos de disposiciones, ofrece una gran flexibilidad en cuanto a tipo de productos, siendo su eficacia dependiente del tamaño de lote producido. Permite una gran especialización de los trabajadores en tareas determinadas y que un mismo operario pueda controlar varias máquinas de manera simultánea.

Se requiere gran flexibilidad en los sistemas de transportes de materiales entre áreas de producción para poder hacer frente a variaciones en la producción. En general, frente a la ventaja que supone la posibilidad de procesar muchos productos diferentes, esta distribución es poco eficiente en la realización de las operaciones y la manutención.

## 2.4.3 Distribución por producto, en cadena o en serie

Cuando toda la maquinaria y equipos necesarios para la fabricación de un determinado producto se agrupan en una misma zona, siguiendo la secuencia de las operaciones que deben realizarse sobre el material, se adopta una distribución por producto. El producto

recorre la línea de producción de una estación a otra siendo sometido a las operaciones necesarias. Este tipo de distribución es la adecuada para la fabricación de grandes cantidades de productos muy normalizados.

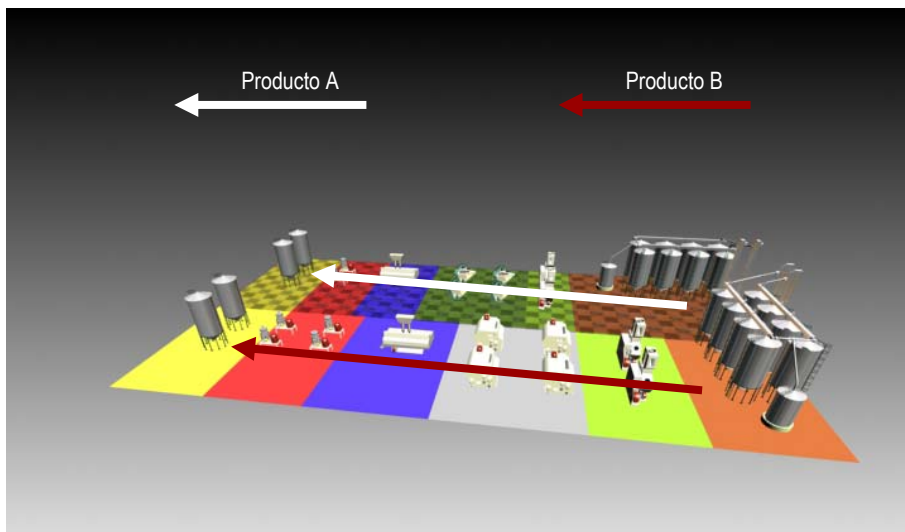


Figura 2.6: Distribución en planta por producto.

Este sistema permite reducir tiempos de fabricación, minimizar el trabajo en curso y el manejo de materiales. Como contrapartidas se pueden citar la falta de flexibilidad, la gran inversión requerida, la poca tolerancia a fallos del sistema (la parada de una máquina puede parar toda la cadena) y la monotonía del trabajo para los operarios.

Ejemplos de distribución por producto se dan en las plantas de ensamblaje de automóviles, el embotellado o el envasado.

#### 2.4.4 Células de trabajo o células de fabricación flexible

Como ya se ha indicado las disposiciones por proceso destacan por su flexibilidad y las distribuciones por producto por su elevada eficiencia. Con la formación de células de trabajo se pretende combinar las características de ambos tipos de sistemas de fabricación, obteniendo una distribución flexible y eficiente.

Este sistema propone la creación de unidades productivas capaces de funcionar con cierta independencia denominadas *células de fabricación flexibles*. Dichas células son agrupaciones de máquinas y trabajadores que realizan una sucesión de operaciones sobre un determinado producto o grupo de productos. Las salidas de las células pueden ser productos finales o componentes que deben integrarse en el producto final o en otros componentes. En este último caso, las células pueden disponerse junto a la línea principal de ensamblaje, facilitando la inclusión del componente en el proceso en el momento y lugar oportunos. La distribución interna de células de fabricación puede realizarse a su vez por proceso, por producto o como mezcla de ambas, aunque lo más frecuente es la distribución por producto.



La introducción de las células de fabricación flexibles redundará en la disminución del inventario, la menor necesidad de espacio en planta, unos menores costes directos de producción, una mayor utilización de los equipos y participación de los empleados, y en algunos casos, un aumento de la calidad. Como contrapartida se requiere un gran desembolso en equipos que sólo es justificable a partir de determinados volúmenes de producción.

Las células de fabricación flexible son los elementos básicos de los *Sistemas de Fabricación Flexibles*, a los que se les puede otorgar la categoría de tipo de distribución en planta (*Distribución de Sistemas de Fabricación Flexibles*) [Tompkins et al., 84].

#### 2.4.5 Tipos básicos de distribución y características fundamentales

A modo de síntesis, la Tabla 2.2 recoge los cuatro tipos básicos de distribución en planta considerados anteriormente y los tipos de operaciones a los que se aplican habitualmente. Por su parte, la Tabla 2.3 presenta las características más relevantes de los distintos tipos de distribución atendiendo a diversos criterios (versión ampliada en [Santamarina, 95] de la original en [Adam et al., 92]).

Tipo de distribución	Operaciones
Por posición fija	• montaje (proyectos de gran envergadura)
Por proceso, por funciones, por secciones o por talleres	• elaboración o tratamiento
Por producto, en cadena o en serie	• montaje • elaboración o tratamiento
Distribución de sistemas de fabricación flexibles	• montaje • elaboración o tratamiento

Tabla 2.2: Tipos de distribución en planta y tipos de operaciones a los que son aplicables habitualmente (tomado de [Santamarina, 95]).

### 2.5. La distribución en planta como problema de diseño

Es una característica común de los problemas de diseño no tener una única solución válida bien definida. Más bien al contrario, es habitual que existan diversas alternativas de solución al mismo problema, cuyas valoraciones dependen en gran medida de los criterios que se empleen en la evaluación. Precisamente, el carácter multicriterio es otra característica presente en gran cantidad de problemas de diseño.

Este es el caso del problema de la distribución en planta, que ya Simon en 1975 [Simon, 75] establece como ejemplo de problema de diseño, caracterizando su proceso de solución como “*satisfacer*” más que “*optimizar*”. Es decir, encontrar soluciones a los problemas que satisfagan las necesidades que los plantearon, más que encontrar la mejor de todas las soluciones posibles.

Atendiendo a	Por producto	Por proceso	Posición fija	Sistemas Flexibles
<b>Producto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Productos estándar</li> <li>▪ Alto volumen de producción</li> <li>▪ Demanda estable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Varios productos con operaciones comunes</li> <li>▪ Volumen de producción variable</li> <li>▪ Demanda variable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo pedido</li> <li>▪ Bajo volumen de producción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Series pequeñas y medianas (lotes)</li> <li>▪ Flexibilidad. Gama de productos amplia</li> </ul>
<b>Líneas flujo material</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Procesos lineales</li> <li>▪ Secuencias iguales para todos los productos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Líneas entremezcladas, retorcidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No definidas</li> <li>▪ Material estático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cortas y sencillas</li> </ul>
<b>Cualificación del trabajador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rutinario y repetitivo</li> <li>▪ Especializado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intermedia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gran flexibilidad</li> <li>▪ Alta cualificación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No hacen falta trabajadores</li> </ul>
<b>Necesidad de personal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gran cantidad</li> <li>▪ Planificación de material-operarios</li> <li>▪ Trabajo de control y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personal de planificación, manejo de materiales, producción y control de inventarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Para programación y coordinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prácticamente nula, sólo supervisión</li> </ul>
<b>Manejo de materiales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Predecible</li> <li>▪ Flujo sistemático y automatizable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flujo variable</li> <li>▪ Sistemas de manejo duplicados a veces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flujo variable</li> <li>▪ Equipos de manejo generales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Síncrono, totalmente automático</li> </ul>
<b>Inventarios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mucha rotación de materiales, inventarios reducidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Largos</li> <li>▪ Mucho trabajo en curso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variables, continuas modificaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mucha rotación de materiales, inventarios reducidos</li> </ul>
<b>Uso de espacios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eficiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poco efectivo</li> <li>▪ Mucho requerimiento por trabajo en curso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baja producción por unidad de espacio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muy efectiva</li> </ul>
<b>Inversión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elevada en equipos especializados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Equipos y procesos flexibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Equipos y procesos móviles de propósito general</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪</li> </ul>
<b>Coste del producto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costes fijos elevados</li> <li>▪ Costes variables bajos (mano de obra y materiales)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costes fijos bajos</li> <li>▪ Costes variables elevados (material y transporte)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajos costes fijos</li> <li>▪ Elevados costes variables (mano de obra y materiales)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costes fijos elevados</li> <li>▪ Costes variables bajos</li> </ul>

Tabla 2.3: Características de los tipos básicos de distribución en planta. Tomado de [Adam et al., 92] y [Santamarina, 95].

Así pues, como con todo problema de diseño, es posible abordar su resolución mediante un proceso sistemático y creativo, análogo al de cualquier otro problema de diseño en ingeniería de proyectos [González-Cruz, 01]. Este proceso, particularizado a la distribución en planta por González-Cruz sería el siguiente:

- Formulación del problema de diseño de distribución en planta: formulación de carácter amplio o de caja-negra.
- Análisis del problema de diseño de distribución en planta: considerando la identificación de los criterios más adecuados a emplear en la evaluación de las diversas alternativas de solución.
- Búsqueda de alternativas de diseño de distribuciones en planta: especificación de las alternativas de la caja-negra formulada en el primer paso del procedimiento.
- Evaluación de las alternativas de diseño de la distribución en planta: “medir” las diferentes alternativas mediante los criterios seleccionados.
- Selección del diseño de distribución en planta preferido.

- Especificación del diseño de distribución en planta que será instalado (distribución de detalle): definición de detalles y generación de documentación de implantación.

Tompkins y otros autores [Tompkins et al., 03] presentan un proceso más detallado particularizado en diez pasos reflejados en la Figura 2.7:

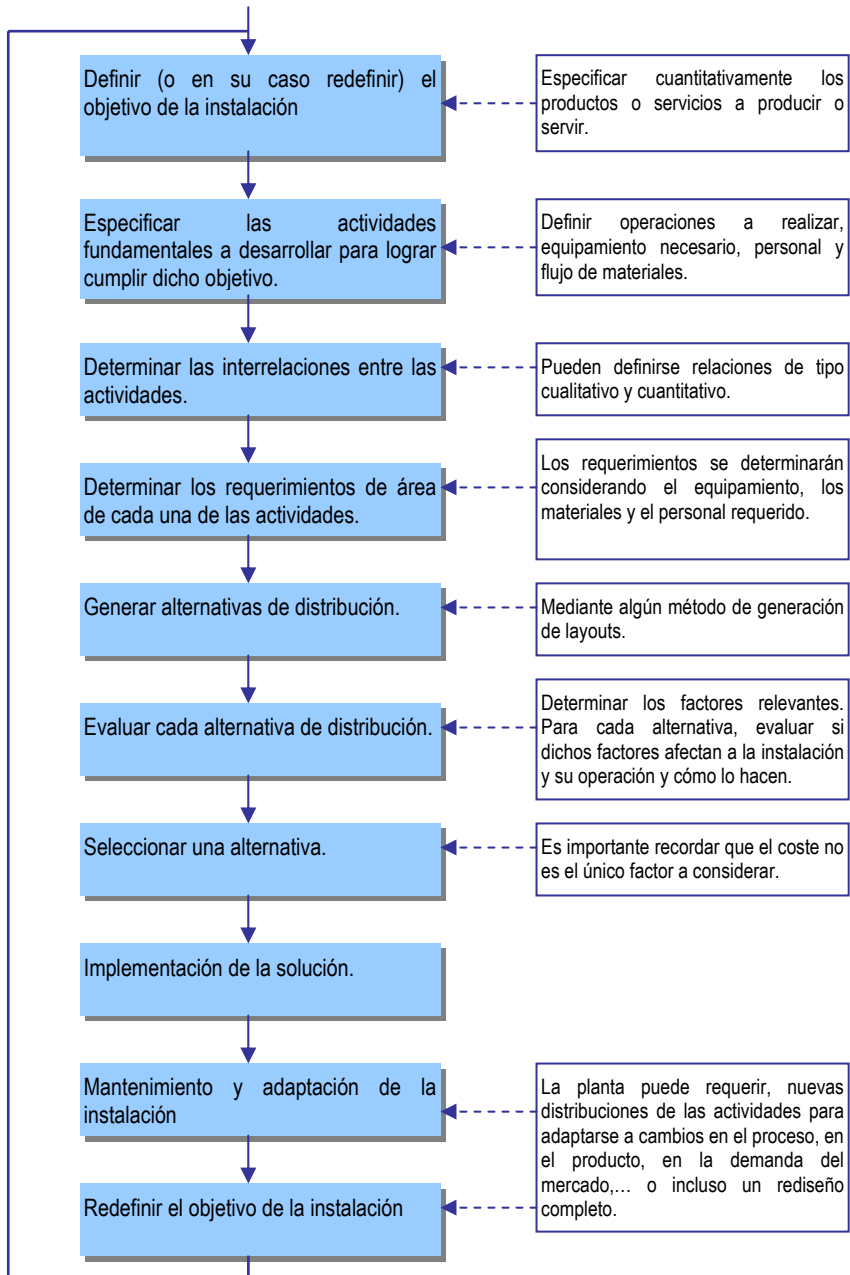


Figura 2.7: Aplicación del proceso de diseño en ingeniería a la distribución en planta.

Como se indicó en 2.1 la planta industrial posee un marcado carácter sistémico. Cada uno de los subsistemas que la componen interactúa y se relaciona con los restantes. Durante el proceso de diseño de la distribución es necesario considerar este aspecto, logrando obtener una solución satisfactoria no sólo para el subsistema “distribución en planta”, si no también para los restantes subsistemas (mantenimiento, almacenaje, edificio industrial, comunicaciones...).

Durante el diseño de la planta es necesario tomar una serie de decisiones fundamentales sobre el producto, el volumen de producción, el proceso de fabricación, los sistemas de mantenimiento y almacenaje, la propia distribución en planta y la planificación de la producción. Aunque el diseño de la distribución en planta es una etapa importante dentro del diseño global de la planta, está condicionado y a su vez condiciona las restantes decisiones de diseño.

En la Figura 2.8 se muestra una *aproximación secuencial*, en la que se toman de manera sucesiva las decisiones de diseño de la planta. El proceso se inicia estableciendo las disposiciones referentes al producto y al proceso de fabricación, y en base a éstas, se diseña la distribución en planta de los medios productivos, lo que a su vez proporciona la base para el diseño de los sistemas de mantenimiento y almacenaje; finalmente, tomadas todas estas decisiones se elabora el plan de producción.

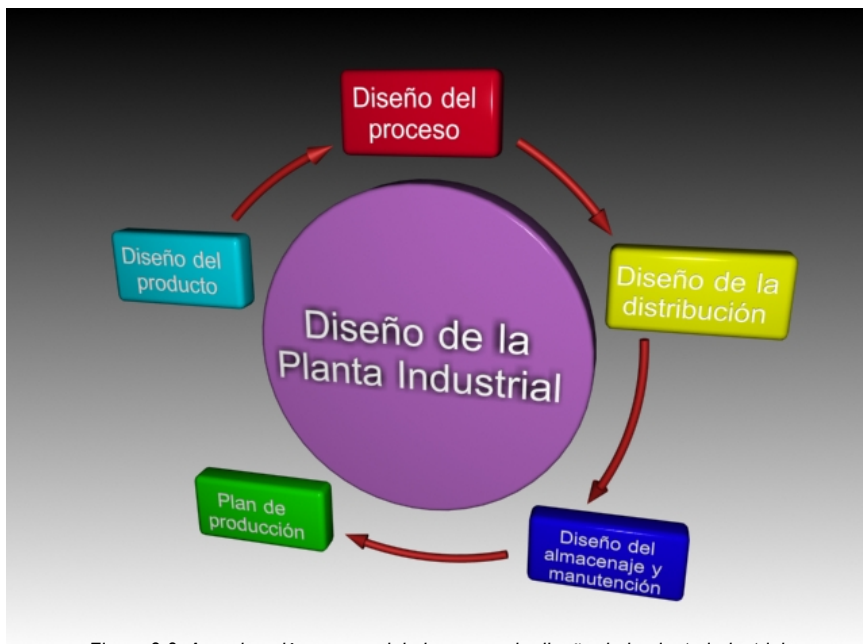


Figura 2.8: Aproximación secuencial al proceso de diseño de la planta industrial.

Dada la influencia que cada una de las decisiones de diseño adoptadas ejerce sobre el resto, frente a este modelo secuencial es preferible una *aproximación integrada* al proceso de diseño Figura 2.9. Siguiendo las líneas de la ingeniería concurrente, el diseñador de la planta debe trabajar coordinadamente con los profesionales más directamente implicados en cada una de las decisiones de diseño a adoptar. Además, dichas decisiones no se toman de

manera secuencial, sino más bien simultánea y recursiva, llegando a compromisos entre las necesidades derivadas de las sucesivas medidas adoptadas. El diseño del producto, del proceso, del plan de producción y del layout, es así una actividad coordinada en la que intervienen profesionales de cada ámbito, logrando soluciones integradoras de las diferentes necesidades a cubrir que mejoran costes, calidad, productividad, niveles de inventario, necesidades de espacio y transporte de materiales, tamaño de los edificios, etc.

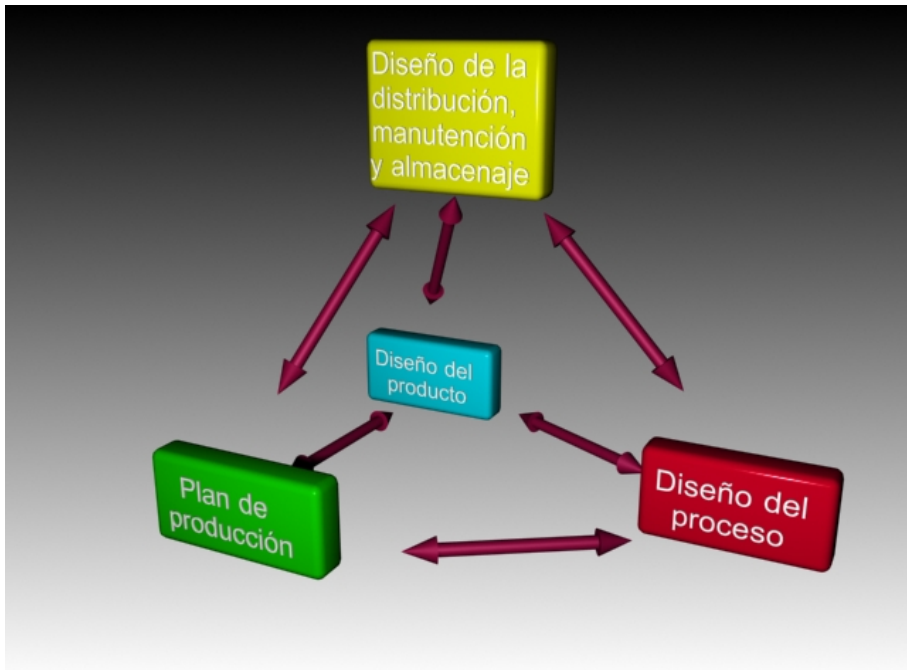


Figura 2.9: Aproximación integrada al proceso de diseño de la planta industrial.

### 2.5.1 Primeras aproximaciones metodológicas al problema de la distribución en planta

Los intentos por establecer una metodología que permitiera afrontar el problema de la distribución en planta de manera ordenada comienzan en la década de los 50 del siglo pasado. Sin embargo, es Muther en 1961, el primero en desarrollar un procedimiento verdaderamente sistemático, el *Systematic Layout Planning* (en adelante SLP) [Muther, 68] que establece una metodología aplicable a la resolución del problema independientemente de su naturaleza.

Los métodos precedentes al SLP son simples e incompletos si se considera el problema de distribución en planta con un mínimo de su complejidad, sin embargo, es necesario contemplarlas desde su contexto, con el final de la 2ª Guerra Mundial todavía próximo y con un crecimiento económico incipiente. Por otra parte, los métodos inmediatamente posteriores

al SLP son en muchos casos variantes de éste más o menos ampliadas, siendo el método de Muther el más difundido.

En los siguientes apartados se describen de manera breve algunas de estas metodologías, tratando el SLP de manera más extensa posteriormente.

### **2.5.1.1 El método de los pasos o etapas básicas de Immer**

Diversos autores coinciden en señalar a Immer como el primero en crear (en 1950) una metodología común para la resolución del problema de distribución en planta [Francis et al., 74; Tompkins et al., 84; Santamarina, 95].

La técnica de Immer es simple en extremo, estableciendo tres etapas o pasos en el proceso de resolución del problema:

**Etapla 1:** Plantear correctamente el problema a resolver.

**Etapla 2:** Detallar las líneas de flujo.

**Etapla 3:** Convertir las líneas de flujo en líneas de materiales.

El método atiende únicamente al principio de circulación o flujo de materiales (ver 2.2.1), y es aplicable solamente a los problemas de reordenación o ajuste menor de una distribución ya existente (problemas tipo 3 y 4 de los definidos en el apartado 2.3).

El propio Immer hace una descripción del análisis de un problema de distribución en los siguientes términos:

*“This analysis should be composed of three simple steps, which can be applied to any type of layout problem. These steps are: 1. Put the problem on the paper. 2. Show lines of flow. 3. Convert flow lines to machine lines.”*

### **2.5.1.2 El *sequence analysis* de Buffa**

El método desarrollado por Buffa en 1955 [Buffa, 55] puede considerarse un precursor del SLP, pudiendo establecerse con éste muchas similitudes. El procedimiento, tal y como se describe en [Santamarina, 95; González-Cruz, 01; González-García, 05] es el siguiente:

**Etapla 1:** Estudio del proceso, recopilación de datos referente a actividades, piezas y recorridos de éstas. Organización de estos datos en forma de Hojas de Ruta y análisis de los requerimientos del sistema productivo.

**Etapla 2:** Determinación de la secuencia de operaciones de cada pieza y elaboración de una tabla con dicha información (“*Sequence summary*”).

**Etapla 3:** Determinación de las cargas de transporte mensuales entre los diferentes departamentos que conforman el proceso. Esta información se recoge en una tabla denominada “Tabla de cargas de transporte” (“*Load summary*”).

**Etapla 4:** Búsqueda de la posición relativa ideal de los diferentes centros de trabajo. Para ello se emplea el “Diagrama Esquemático Ideal” (Figura 2.10). Este diagrama es un grafo en el que los diferentes departamentos son representados mediante círculos. Cada círculo está unido a los demás mediante líneas que representan el flujo de materiales entre los

respectivos departamentos. Sobre cada línea de unión se expresa mediante un número la carga de transporte que simboliza. La generación de este grafo debe tratar de minimizar el número de cruzamientos de las líneas de transporte de materiales y que los departamentos con mayor flujo entre ellos queden situados lo más próximos posible<sup>5</sup>. Este grafo se estudia y rehace, mejorándolo en los sucesivos intentos, hasta generar aquél que mejor logra los objetivos antes mencionados<sup>6</sup>.

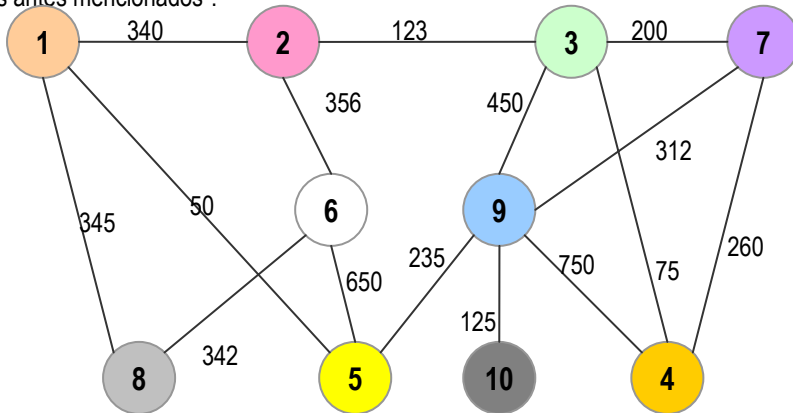


Figura 2.10: Diagrama esquemático ideal en el Sequence Analysis de Buffa.

**Etapa 5:** Desarrollo del *Diagrama esquemático ideal* en un *Diagrama de bloques* en el que los diferentes departamentos ocupan sus áreas correspondientes y en el que se muestran las relaciones interdepartamentales.

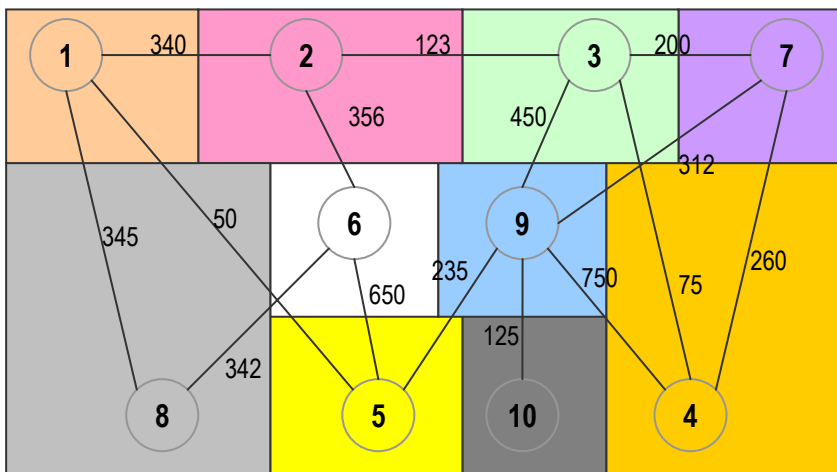


Figura 2.11: Diagrama de bloques en el Sequence Analysis de Buffa.

<sup>5</sup> En este punto del proceso los departamentos se consideran sin área y son representados como puntos sin dimensiones.

<sup>6</sup> Este planteamiento dará lugar posteriormente a un conjunto de métodos de resolución del problema de distribución en planta basados en la teoría de grafos.

**Etapa 6:** Desarrollo del layout de detalle, en el que se especifican los sistemas de manutención, sistemas de almacenaje, sistemas auxiliares de producción y en definitiva, se establece la distribución que finalmente se implementará.

De nuevo, como ocurre con el método de Immer, es el flujo de materiales entre actividades el único criterio contemplado para establecer la disposición de las actividades. Sin embargo, ya en 1952, Cameron [Cameron, 52] había realizado las primeras referencias al uso de criterios cualitativos en el diseño de las distribuciones de las actividades, que sí consideraría posteriormente Muther en su SLP.

### 2.5.1.3 Propuestas metodológicas posteriores al SLP

Posteriormente a la propuesta del SLP (que será abordada en el próximo apartado), aparecen variantes más o menos detalladas de dicho método y otras propuestas que no alcanzan el grado de aceptación de la de Muther. Las más destacadas son expuestas a continuación.

#### 2.5.1.3.1 La propuesta de Reed

En 1961, Reed propone que el diseño de las instalaciones se realice siguiendo un planteamiento sistemático en 10 pasos [Tompkins et al., 84]:

- Estudiar el producto a fabricar.
- Determinar el proceso necesario para fabricar dicho producto y sus requerimientos.
- Preparar esquemas de planificación del layout: en los que se especifique información como las operaciones a realizar, los transportes y almacenajes necesarios, inspecciones requeridas, tiempos estándar de cada operación, selección y balance de maquinaria, requerimiento de mano de obra, etc.
- Determinación de las estaciones de trabajo.
- Determinar los requerimientos de áreas para almacenamiento.
- Determinación de la anchura mínima de los pasillos.
- Establecimiento de las necesidades de área para actividades de oficina.
- Consideración de instalaciones para personal y servicios.
- Planificar los servicios de la planta.
- Prever posibles futuras expansiones.

#### 2.5.1.3.2 El “*ideal systems approach*” de Nadler

La metodología propuesta por Nadler en 1965 [Tompkins et al., 84], se concibió en principio para el diseño de sistemas de trabajo, pero es aplicable, además, al diseño de la distribución en planta de instalaciones. El “Método de los sistemas ideales” es una aproximación jerárquica al diseño; es más una filosofía de trabajo que un procedimiento. Dicha aproximación se realiza partiendo del sistema ideal teórico que resuelve el problema



planteado, para ir descendiendo en el grado de idealidad/idoneidad hasta alcanzar una solución factible al problema. El planteamiento se esquematiza en la Figura 2.12.



Figura 2.12: Esquema del "ideal systems approach" de Nadler.

El *sistema teórico ideal* es un sistema perfecto de coste cero, calidad absoluta, sin riesgos, sin producción de deshechos y absolutamente eficiente. El *sistema ideal último* representa una solución que la tecnología no permite implementar en el momento actual, pero que previsiblemente lo será en el futuro. El *sistema ideal tecnológicamente viable* representa una solución para la que la tecnología actual puede dar respuesta, pero cuya implementación en la actualidad no es recomendable debido a algún motivo, por ejemplo, a su elevado coste. El *sistema recomendado* o *recomendable*, es una solución válida al problema con una aceptable eficiencia y coste, y cuya implementación es posible sin problemas. El *sistema real* o presente, es la implementación efectiva o existente de la solución.

Los sistemas convencionales de diseño realizan una aproximación contraria al problema. Comienzan con la solución existente y buscan mejoras a dicha solución. El método de Nadler parte de una solución ideal no factible, para aproximarse hacia la zona de factibilidad del espacio de soluciones del problema.

#### 2.5.1.3.3 La propuesta de Apple

Apple establece una secuencia muy detallada de pasos a realizar en el diseño del layout de la planta industrial [Tompkins et al., 84]. Esta propuesta es más específica y concreta que las anteriores, concretándose en los siguientes puntos:

1. Obtener los datos básicos del problema.
2. Analizar dichos datos.
3. Diseñar el proceso productivo

4. Proyectar los patrones de flujo de materiales
5. Determinar el plan general de manejo de materiales.
6. Calcular los requerimientos de equipamiento
7. Planificar los puestos de trabajo de manera individualizada
8. Seleccionar equipos de manutención específicos
9. Establecer grupos de operaciones relacionadas
10. Diseñar las relaciones entre actividades
11. Determinar los requerimientos de almacenamiento
12. Planificar los servicios y actividades auxiliares
13. Determinar los requerimientos de espacio
14. Localizar las actividades en el espacio total disponible
15. Escoger el tipo de edificio
16. Construir una distribución en planta maestra
17. Evaluar y ajustar la distribución en planta
18. Obtener las aprobaciones necesarias
19. Instalar la distribución obtenida
20. Hacer un seguimiento del funcionamiento de la instalación

### 2.5.2 El systematic layout planning (SLP) de Muther

El SLP fue desarrollado por Richard Muther [Muther, 68] como un procedimiento sistemático multicriterio y relativamente simple, para la resolución de problemas de distribución en planta de diversa naturaleza. El método es aplicable a problemas de distribución en instalaciones industriales, locales comerciales, hospitales, etc. Establece una serie de fases y técnicas que, como el propio Muther describe, permiten identificar, valorar y visualizar todos los elementos involucrados en la implantación y las relaciones existentes entre ellos.

EL SLP se asienta sobre la base de la información referente al problema a resolver para, a través de un proceso de cuatro etapas, obtener una distribución válida como solución al problema planteado. Además de las relaciones entre los diferentes departamentos, cinco tipos de datos son necesarios como entradas del método:

**Producto (P):** considerándose aquí producto también a los materiales (materias primas, piezas adquiridas a terceros, productos en curso, producto terminado, etc.)

**Cantidad (Q):** definida como la cantidad de producto o material tratado, transformado, transportado, montado o utilizado durante el proceso.

**Recorrido (R):** entendiéndose recorrido como la secuencia y el orden de las operaciones a las que deben someterse los productos.

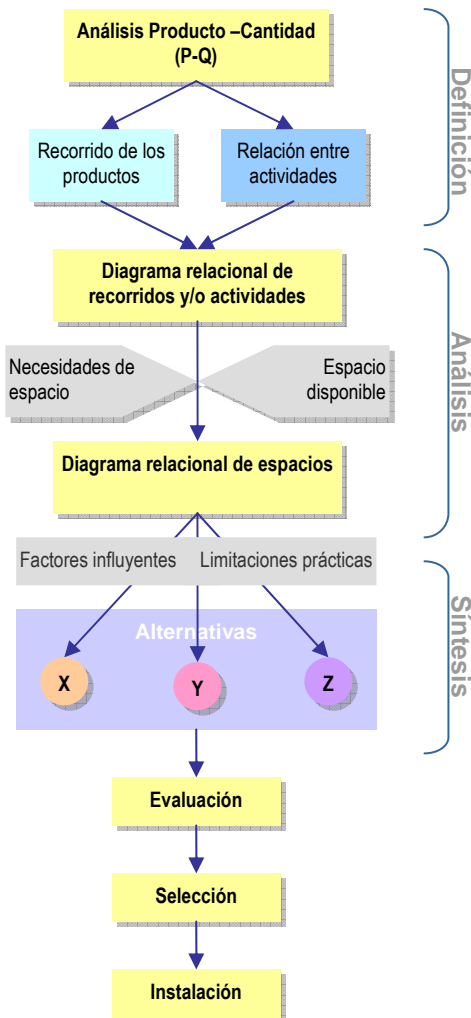


Figura 2.13: Esquema del systematic layout planning [Muther, 68].

**Servicios (S):** los servicios auxiliares de producción, servicios para el personal, etc.

**Tiempo (T):** utilizado como unidad de medida para determinar las cantidades de producto o material, dado que éstos se miden habitualmente en unidades de masa o volumen por unidad de tiempo.

Esta información es el punto de partida del proceso, y de la calidad de la misma depende el éxito en la búsqueda de soluciones al problema de distribución. Por tanto, debe dedicarse el tiempo y los recursos necesarios a su obtención.

La primera de las fases de aplicación del SLP es el análisis producto-cantidad.

### 2.5.2.1 Análisis P-Q

El análisis de la información referente a los productos y cantidades a producir es el punto de partida del método. A partir de este análisis es posible determinar el tipo de distribución adecuado para el proceso objeto de estudio. Muther recomienda la elaboración de una gráfica en forma de histograma de frecuencias, en la que se representen en abcisas los diferentes productos a elaborar y en ordenadas las cantidades de cada uno. Los productos deben ser representados en la gráfica en orden decreciente de cantidad producida. En

función del tipo de histograma resultante es recomendable la implantación de un tipo u otro de distribución. En el caso (a) (veáse Figura 2.14), en el que se produce una única unidad de un único producto, la distribución adecuada (e inevitable) es de posición fija, suponiendo que se trata de un proyecto de gran envergadura. La gráfica (b) hace recomendable una distribución en cadena. Este tipo de gráficas en las que pocos productos ocupan la mayor parte de la producción (principio de Pareto), indican series largas de producción homogénea, lo que hace recomendable distribuciones orientadas al producto. La existencia de gran diversidad de productos con niveles de producción similares (c), aconsejarían una

distribución de mayor flexibilidad orientada al proceso. Por último, situaciones como la señalada en la gráfica (d), pueden afrontarse con distribuciones mixtas, buscando la máxima flexibilidad y eficiencia, por ejemplo con células de fabricación flexible [Cuatrecasas-Arbós, 96].

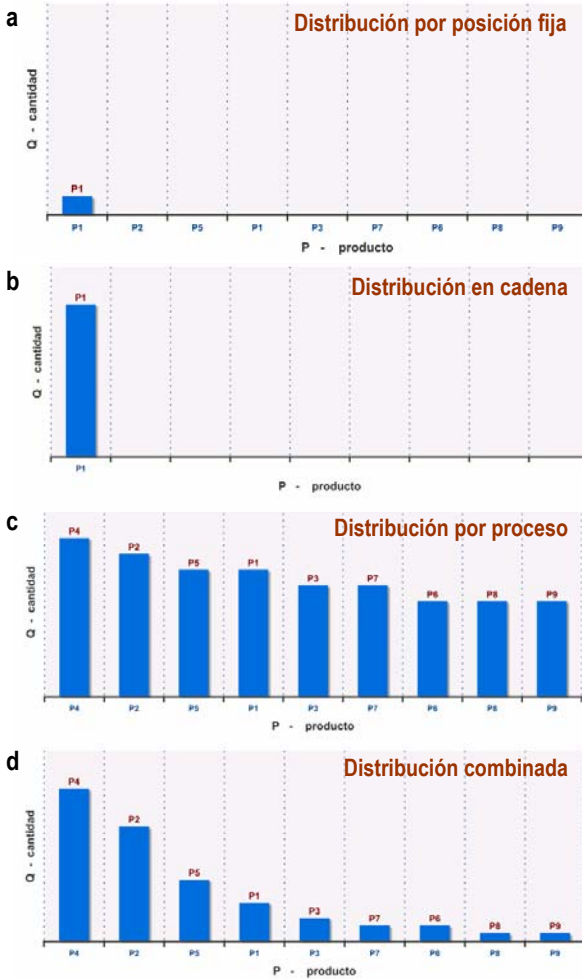


Figura 2.14: Gráficas P-Q habituales de cada tipo de distribución en planta.

por cada proceso. Los *Diagramas multiproducto* son adecuados cuando se producen pocos productos. En ellos se indica únicamente la secuencia de operaciones a la que se somete cada pieza o producto. Las *Tablas matriciales* se emplean en el caso de producir gran cantidad de productos. Esta representación es una matriz cuadrada en la que tanto en filas como en columnas figuran las diferentes operaciones del proceso productivo. En las casillas se indica el número de veces que un producto circula desde la operación fila a la operación columna.

### 2.5.2.2 Análisis del recorrido de los productos

Se trata en esta fase de determinar la secuencia, la cantidad y el coste de los movimientos de los productos por las diferentes operaciones durante su procesado. A partir de la información del proceso productivo y de los volúmenes de producción, se elaboran gráficas y diagramas descriptivos del flujo de materiales. Estos pueden ser principalmente de tres tipos:

- Diagramas de recorrido sencillo
- Diagramas multiproducto
- Tablas matriciales

Cuando se producen muy pocos productos (o uno sólo) en cantidades pequeñas, se emplean *Diagramas de recorrido sencillo*, en los que quedan reflejados con exactitud los recorridos de cada producto

### 2.5.2.3 Análisis de las relaciones entre actividades

Conocido el recorrido de los productos, el proyectista debe plantearse el tipo y la intensidad de las interacciones existentes entre las diferentes actividades productivas, los medios auxiliares, los sistemas de manutención y los diferentes servicios de la planta. Estas relaciones no se limitan a la circulación de materiales, pudiendo ser ésta irrelevante o incluso inexistente entre determinadas actividades; por ejemplo, no suele existir circulación entre los medios auxiliares de producción. La no existencia de flujo material entre dos actividades no implica que no puedan existir otro tipo de relaciones que determinen, por ejemplo, la necesidad de proximidad entre ellas; o que las características de determinado proceso requieran una determinada posición en relación a determinado servicio auxiliar.

Entre otros aspectos, el proyectista debe considerar en esta etapa las exigencias constructivas, ambientales, de seguridad e higiene, los sistemas de manutención necesarios, el abastecimiento de energía y la evacuación de residuos, la organización de la mano de obra, los sistemas de control del proceso, los sistemas de información, etc.

Esta información resulta de vital importancia para poder integrar los medios auxiliares de producción en la distribución de una manera racional. Para poder representar las relaciones encontradas de una manera lógica y que permita clasificar la intensidad de dichas relaciones, se emplea la *tabla relacional de actividades* (Figura 2.15), consistente en un cuadro organizado en diagonal, en el que quedan plasmadas las necesidades de proximidad entre cada actividad y las restantes desde diversos puntos de vista. Es habitual expresar estas necesidades mediante el código de 6 letras representado en la figura.

En la práctica, el análisis de recorridos expuesto en el apartado anterior se emplea para relacionar las actividades directamente implicadas en el sistema productivo, mientras que la tabla relacional permite integrar los medios auxiliares de producción.

### 2.5.2.4 Diagrama relacional de recorridos y/o actividades

La información recogida hasta el momento, referente tanto a las relaciones entre las actividades como a la importancia relativa de la proximidad entre ellas, es recogida en un diagrama que Muther denomina *Diagrama relacional de recorridos y/o actividades*<sup>7</sup>. Éste pretende recoger la ordenación topológica de las actividades en base a la información de la que se dispone.

El diagrama es un grafo en el que las actividades son representadas por nodos unidos por líneas. Las líneas expresan la existencia de algún tipo de relación entre las actividades unidas. La intensidad de la relación quedará reflejada mediante números junto a las líneas (ver Figura 2.16 (a)) o mediante el correspondiente código ((ver Figura 2.16 (b)). La ordenación del grafo debe realizarse de manera que se minimice el número de cruces entre las líneas que representan las relaciones entre las actividades, o por lo menos entre aquellas que representen una mayor intensidad relacional. De esta forma, se trata de conseguir distribuciones en las que las actividades con mayor flujo de materiales estén lo más próximas posible (cumpliendo el principio de la mínima distancia recorrida, ver 2.2.1), y en las que la secuencia de las actividades sea similar a aquella con la que se tratan, elaboran o montan

---

<sup>7</sup> Este gráfico es similar al *Diagrama Esquemático Ideal* de Buffa (ver 2.5.1.2).

los materiales (principio de la circulación o flujo de materiales).

En teoría de grafos, a obtener un diagrama con dichas características se le denomina localizar el *grafo planar maximal*, y de hecho, existe un conjunto de técnicas para la generación de layouts basadas en la teoría de grafos, que parten del diagrama relacional para obtener distribuciones que den solución al problema planteado.

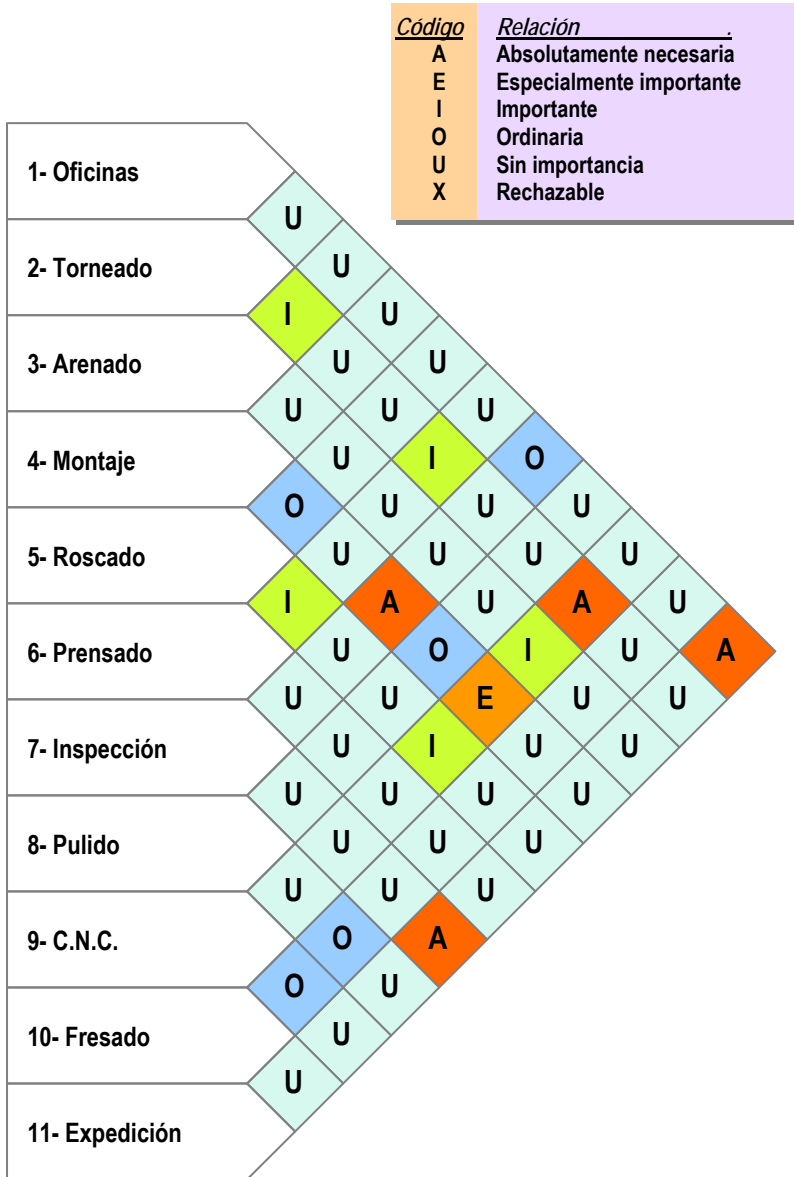


Figura 2.15: Tabla relacional de actividades.

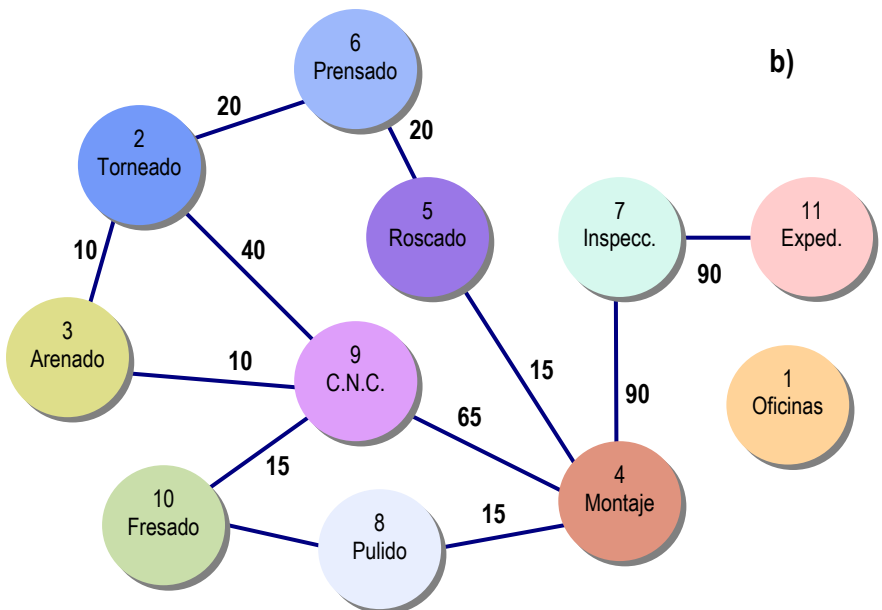
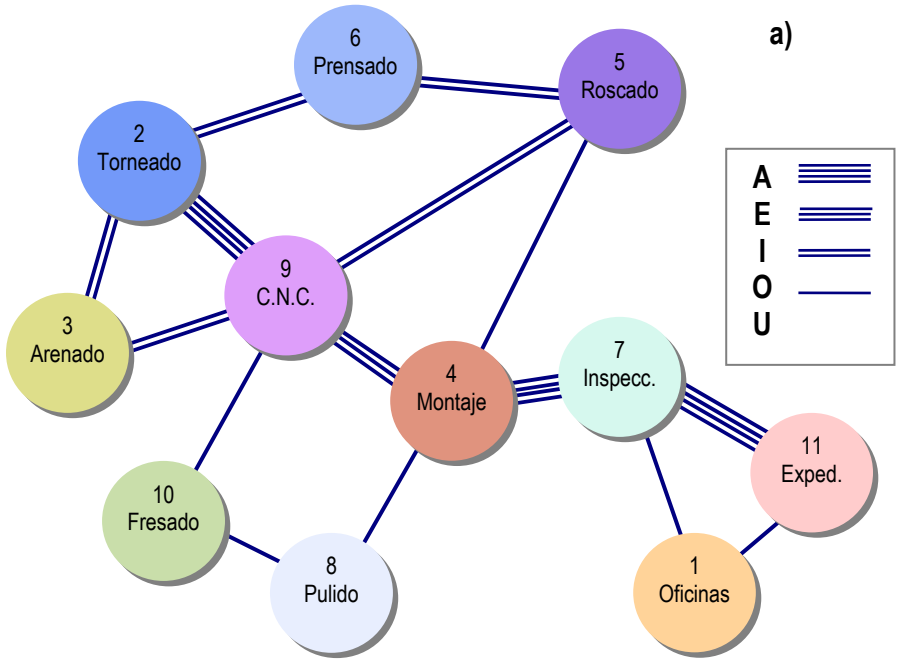


Figura 2.16: Diagrama relacional de actividades (a) y recorridos (b).

### 2.5.2.5 Diagrama relacional de espacios

La topología del diagrama relacional de recorridos y/o actividades recoge información sobre las necesidades de proximidad y las ubicaciones preferibles de cada actividad. Sin embargo, en dicho grafo los departamentos que deben acoger las actividades son adimensionales y no poseen una forma definida. El siguiente paso hacia la obtención de alternativas factibles de distribución es la introducción en el proceso de diseño, de información referida al área requerida por cada actividad para su normal desempeño. El planificador debe hacer una previsión, tanto de la cantidad de superficie, como de la forma del área destinada a cada actividad.

No existe un procedimiento general ideal para el cálculo de las necesidades de espacio. El proyectista debe emplear el método más adecuado al nivel de detalle con el que se está trabajando, a la cantidad y exactitud de la información que se posee y a su propia experiencia previa. El espacio requerido por una actividad no depende únicamente de factores inherentes a sí misma, si no que puede verse condicionado por las características del proceso productivo global, de la gestión de dicho proceso o del mercado. Por ejemplo, el volumen de producción estimado, la variabilidad de la demanda o el tipo de gestión de almacenes previsto pueden afectar al área necesaria para el desarrollo de una actividad. En cualquier caso, hay que considerar que los resultados obtenidos son siempre previsiones, con base más o menos sólida, pero en general con cierto margen de error.

El planificador puede hacer uso de los diversos procedimientos de cálculo de espacios existentes para lograr una estimación del área requerida por cada actividad. Los datos obtenidos deben confrontarse con la disponibilidad real de espacio. Si la necesidad de espacio es mayor que la disponibilidad, deben realizarse los reajustes necesarios; bien disminuir la previsión de requerimiento de superficie de las actividades, o bien, aumentar la superficie total disponible modificando el proyecto de edificación (o el propio edificio si éste ya existe). El ajuste de las necesidades y disponibilidades de espacio suele ser un proceso iterativo de continuos acuerdos, correcciones y reajustes, que desemboca finalmente en una solución que se representa en el llamado *Diagrama relacional de espacios*.

El *Diagrama relacional de espacios* es similar a los diagramas relacionales presentados previamente (de actividades y de recorridos), con la particularidad de que en este caso los símbolos distintivos de cada actividad son representados a escala, de forma que el tamaño que ocupa cada uno sea proporcional al área necesaria para el desarrollo de la actividad (Figura 2.17). En estos símbolos es frecuente añadir, además, otro tipo de información referente a la actividad como, por ejemplo, el número de equipos o la planta en la que debe situarse.

Con la información incluida en este diagrama se está en disposición de construir un conjunto de distribuciones alternativas que den solución al problema. Se trata pues de transformar el diagrama *ideal* en una serie de distribuciones *reales*, considerando todos los factores condicionantes y limitaciones prácticas que afectan al problema. Como se indica en la Figura 2.13, el *systematic layout planning* finaliza con la implantación de la mejor alternativa tras un proceso de evaluación y selección. El planificador puede optar por diversas formas de generación de layouts (desde las meramente manuales hasta las más complejas técnicas metaheurísticas), y de evaluación de los mismos.



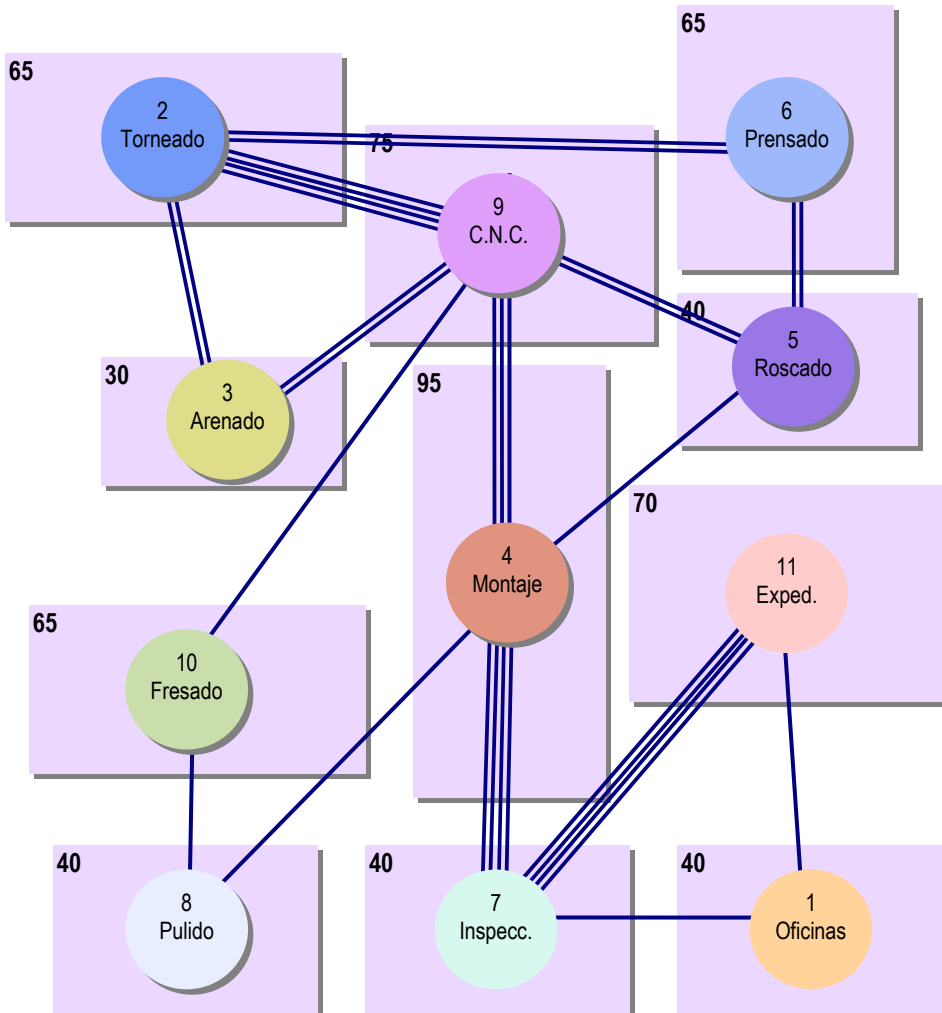


Figura 2.17: Diagrama relacional de espacios con indicación del área requerida por cada actividad.

## 2.6. Medición de la distancia y de la forma

Antes de abordar las técnicas presentadas en la bibliografía para la resolución del problema de la distribución en la planta de las diferentes actividades, se hace necesario determinar la forma en la que se medirá la distancia entre ellas una vez ubicadas, y la forma de las áreas asignadas a cada actividad. La mayor parte de los criterios empleados para la evaluación de la calidad de una solución determinada, utiliza la distancia entre las diferentes actividades de una forma u otra.

Por ejemplo, es muy habitual emplear el sumatorio del flujo entre cada par de actividades multiplicado por la distancia entre ellas. Por otra parte, para poder establecer cualquier tipo de restricción geométrica al área asignada a cada actividad es necesario poseer una manera de medir dicha forma.

### 2.6.1 Métricas de distancia

En algunos planteamientos las funciones evaluadoras miden únicamente la adyacencia entre actividades; es decir, que las actividades que así lo requieran posean una frontera común, aunque lo más habitual es medir si la disposición de las actividades es adecuada en base a la distancia a las que han sido ubicadas.

Aunque hay otras posibilidades, las métricas más frecuentemente empleadas miden la distancia entre los centroides de las áreas asignadas a las actividades. Ésta es una simplificación debida a que la localización de los puntos de recepción y expedición de materiales en cada actividad, son desconocidos hasta que no se determine el layout detallado y escogidos los sistemas de transporte de materiales. Así pues, el centroide representa en estos modelos tanto el punto de recepción como el de expedición del flujo de materiales interdepartamental.

Un problema de la utilización del centro geométrico de las áreas de las actividades como origen y final de las mediciones, es que hace necesario el empleo de mecanismos que eviten disposiciones *en diana* o excesivamente esbeltas de las actividades (Figura 2.18) que, aunque minimizan la distancia entre los centroides, no son operativas en la práctica.

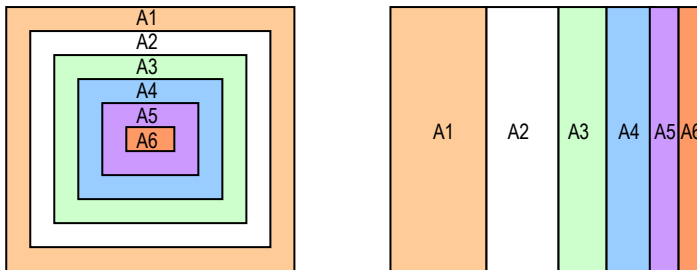


Figura 2.18: Disposiciones que minimizan las distancia entre centroides de las áreas de las actividades.

Las métricas más extendidas son de tipo Minkowski, en las que la distancia n-dimensional entre dos actividades *i* y *j* se determina de la forma:

$$d_{ij}(p) = \sqrt[p]{\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^p}$$

haciendo variar *p* entre 1 e infinito obtenemos los diferentes tipos de métricas.

En [Heragu, 97] y en [Tompkins et al., 03] se enumeran las métricas más comunes; éstas son, para los centroides de dos actividades (*x<sub>i</sub>*, *y<sub>i</sub>*) y (*x<sub>j</sub>*, *y<sub>j</sub>*):

**Euclídea:** es una métrica Minkowsky con  $p=2$ , igual a la longitud de un segmento rectilíneo que une los centroides de las actividades. Su fórmula es, para dos dimensiones:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

**Euclídea cuadrática:** esta métrica, similar a la Euclídea, atribuye un mayor peso a aquellas actividades que se encuentran muy alejadas. No sigue el esquema Minkowsky y su formulación es:

$$d_{ij} = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$$

**Manhattan:** También denominada rectangular o rectilínea, es una métrica Minkowsky con  $p=1$ . Representa la suma de las distancias vertical y horizontal entre los centroides de las actividades. Se expresa como:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

**Tchebychev:** Métrica Minkowsky con  $p=\infty$ , que considera la distancia como la mayor de las distancias (vertical u horizontal) entre los centroides de las actividades:

$$d_{ij} = \max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|)$$

**Contorno lateral:** Se calcula como el recorrido que debe realizar el material entre dos actividades a lo largo de pasillos que rodean las actividades existentes entre las dos consideradas. En la Figura 2.19 se calcularía como la suma de las longitudes de los segmentos azules. Aunque pueden emplearse los centroides de las actividades como inicio y final del recorrido, es habitual la definición de puntos de entrada y salida de materiales para calcular el contorno lateral.

**Adyacencia:** Es la métrica más sencilla, que únicamente distingue si las actividades comparten alguno de sus lados. Es empleada habitualmente con criterios cualitativos que estiman la

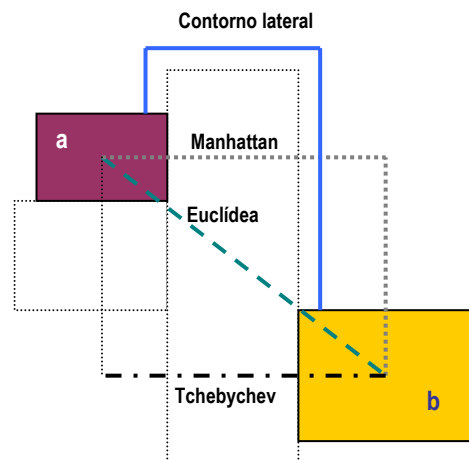


Figura 2.19: Métricas de distancia entre actividades. Ampliado de [Shebanie, 02].

conveniencia o no de que dos actividades sean adyacentes

$$d_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{; si las actividades } i \text{ y } j \text{ son adyacentes} \\ 1 & \text{; en caso contrario} \end{cases}$$

**Camino más corto:** Esta métrica se emplea en planteamientos de resolución basados en teoría de grafos. Existen habitualmente varios caminos entre dos nodos del grafo cuyas longitudes, costes o tiempos de transporte vienen representadas mediante pesos. Esta métrica permite seleccionar el más corto.

La selección de una métrica u otra depende del sistema de transporte de materiales que se empleará [Heragu, 97; Tompkins et al., 03]. Por ejemplo, la utilización de un puente grúa de motores independientes en dos direcciones, se modelizará adecuadamente mediante la métrica de Tchebychev. El tiempo de transporte entre dos actividades será el que se tarde en recorrer la componente más larga (horizontal o vertical) del vector que une ambas actividades. Para carretillas o vehículos autoguiados, que deben desplazarse por pasillos que rodean los diferentes departamentos, el contorno lateral o la Manhattan serán las métricas más apropiadas. Las cintas transportadoras se modelizan mediante métricas Euclídeas.

La selección de una única métrica para medir la distancia entre todas las actividades en un problema puede considerarse una simplificación excesiva, dado que lo habitual es que un mismo proceso productivo necesite emplear diferentes sistemas de manutención. Algunas propuestas, como la de [Ozdemir et al., 03], introducen métricas heterogéneas dentro de un mismo problema.

Además de las métricas de uso habitual ya expuestas, algunos autores proponen otras más elaboradas, como es el caso de la distancia rectilínea esperada (EDIST) [Bozer et al., 97] o estudian el problema de la definición de los puntos de expedición o recepción, y el flujo de materiales intradepartamental: [Benson et al., 97; Chittratanawat et al., 99; Kim et al., 00; Arapoglu et al., 01; Shebanie, 02].

## 2.6.2 Medición de la forma

El establecimiento de restricciones de tipo geométrico a las actividades en los problemas multiárea, requiere definir maneras de evaluar la calidad de la forma de los departamentos a los que son asignadas. En la bibliografía es posible encontrar diferentes formas de medir la calidad formal de las soluciones, que en general se basan en la premisa de que es deseable que la forma de los departamentos sea lo más rectangular posible.

La mayor parte de los indicadores de calidad formal localizados en la bibliografía están dirigidos a un planteamiento discreto del problema, en el que las áreas de las actividades pueden adoptar formas más complejas e incluso desagregadas (separadas en áreas inconexas) que en los modelos continuos, en los que las áreas son, de manera general, rectangulares. El control de la desagregación será tratado posteriormente en el apartado 2.7.1.3.2.

En [Raoot et al., 93b] y en [Bozer et al., 94] se proponen indicadores de la calidad formal de las actividades ampliamente usados posteriormente. El primero de ellos parte del hecho de que dada una superficie con un área determinada, un mayor perímetro del área implica una mayor irregularidad de la forma. El menor perímetro corresponderá a la forma cuadrada; es decir, para una actividad  $i$  de área  $A_i$ , el perímetro será:

$$P_i^* = 4 \sqrt{A_i}$$

Si se considera ésta la forma óptima de la actividad, puede definirse un indicador normalizado ( $\Omega_1$ ) del grado de alejamiento del área asignada a una actividad de dicho óptimo, que se expresa como:

$$\Omega_1 = \frac{\frac{P_i}{A_i}}{\frac{P_i^*}{A_i}} = \frac{P_i}{P_i^*} = \frac{P_i}{4 \sqrt{A_i}}$$

Otro criterio propuesto es la *compacidad* ( $\Omega_2$ ), que trata de medir la desviación de la forma de una actividad respecto de un rectángulo. Se define como:

$$\Omega_2 = \frac{A_i}{A_{r_i}}$$

donde  $A_i$  es el área de la actividad  $i$ , y  $A_{r_i}$  es el área del rectángulo de menor área en el que puede inscribirse la actividad  $A_i$  dada su forma.

El tercer indicador ( $\Omega_3$ ) de la calidad formal del área de la actividad su calcula como el cociente entre el lado menor ( $l_{min}$ ) y el lado mayor ( $l_{max}$ ) del menor rectángulo en que puede inscribirse la actividad.

$$\Omega_3 = \frac{l_{min}}{l_{max}}$$

Por último, la calidad formal puede medirse mediante un símil con el momento de inercia de un cuerpo. Si se supone que la superficie asignada a la actividad tiene una densidad constante, puede calcularse su momento de inercia respecto al centro de gravedad. Así pues, para una actividad distribuida en  $n$  celdas, siendo  $m_i$  la masa asociada a la celda  $i$  y  $d_i$  la distancia de la celda  $i$  al centro de gravedad de la actividad, la expresión del indicador es:

$$\Omega_4 = \sum_{i=1}^{n_i} m_i d_i^2$$

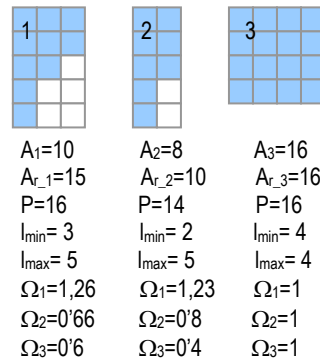


Figura 2.20: Cálculo de la compacidad de actividades

## 2.7. Clasificación de las técnicas para la resolución del problema

La *teoría de la complejidad* estudia la dificultad intrínseca de la resolución de los problemas de optimización y decisión [Garey et al., 79]. Según dicha teoría, resolver una instancia de un problema<sup>8</sup> es obtener el valor óptimo de la función objetivo, es decir, se resuelve únicamente si se encuentra dicho valor y no una aproximación al mismo. Esta teoría clasifica los problemas en diversas categorías en función del número máximo de pasos que necesitaría un ordenador para la resolución; algunas de estas categorías o clases son:

La **Clase P**, que incluye a los problemas para los que existe un algoritmo de resolución tal, que el número de pasos de cálculo que requiere se puede expresar mediante una función polinomial del tamaño del problema y; la **Clase NP** que incluye aquellos problemas para los que no se conoce un algoritmo de resolución en tiempo polinómico, pero que pueden ser resueltos en dicho tiempo si se emplea un proceso de ilimitadas búsquedas paralelas independientes (mediante una computadora no determinista). De otra manera, la clase NP contiene todos los problemas para los que puede determinarse si una solución concreta es factible o no (problema de decisión), mediante un algoritmo en el que el número de pasos de cálculo se puede expresar mediante una función polinomial. La clase NP incluye a la clase P.

Un problema se denomina **NP-duro**, si cualquier problema de la clase NP se puede transformar en dicho problema. Un problema es **NP-completo** si es de clase P y NP-duro. Los problemas NP-completos tienen la propiedad de que cualquier problema de NP puede ser reducido a él en tiempo polinómico. Esto, y que a este tipo de problemas pertenezcan algunos clásicos (como el Circuito Hamiltoniano o el Problema del Viajante) para los que no se ha encontrado algoritmos de resolución en tiempos polinomiales, hace asumir que los problemas NP-completos son los más difíciles de resolver, y que con toda probabilidad necesiten tiempos de cálculo expresados mediante funciones exponenciales del tamaño del problema (clase EXP).

La Teoría de la complejidad sugiere, pues, que para los problemas NP-completos, a los que pertenece el que se trata en la presente tesis, no existe un algoritmo que proporcione una solución óptima en un tiempo razonable. Esto, unido a que el esfuerzo para comprobar la validez de una solución en un problema de este estilo no es muy elevado, ha provocado que la tendencia en los métodos de resolución evolucionara desde las técnicas enumerativas o exactas, hacia procedimientos heurísticos que proporcionan soluciones aceptables en tiempos de cálculo realistas.

Desde la década de los 50 del pasado siglo, y a partir de la formulación del problema planteado como del tipo cuadrático de asignación [Koopmans et al., 57], han sido muchas las técnicas y métodos elaborados para su resolución, con mayor o menor aproximación a la aplicabilidad inmediata de los resultados y con enfoques más o menos cercanos al carácter práctico y multicriterio del problema. Como resultado, existe un amplio abanico de propuestas que enfocan el problema con diferentes estrategias de construcción o mejora, formas diversas de evaluar las soluciones, o que emplean procedimientos basados en distintas analogías naturales. Determinadas publicaciones han supuesto una contribución

---

<sup>8</sup> La palabra "problema" se asocia a una descripción genérica de un problema, mientras que el término "instancia" se aplica a un problema en el que se han especificado todos los datos exactamente.

fundamental al problema abriendo nuevas vías de solución. Otras propuestas son variantes y mejoras de los procedimientos anteriores que, en conjunto, forman una gran batería de herramientas a disposición del planificador.

En principio las técnicas enumerativas o semi-enumerativas eran las predominantes en el intento de obtener soluciones óptimas. Posteriormente, y ante la complejidad del problema aparecerán y prevalecerán hasta la actualidad los métodos heurísticos. La clasificación de las técnicas para la resolución de este problema puede abordarse bajo distintos criterios, y en la bibliografía es posible encontrar abundantes recopilaciones de métodos (por ejemplo: [Rosenblatt, 79; Kusiack et al., 87] para el problema de layout específicamente, y [Stützle et al., 01; Loiola et al., 04] centradas en el problema cuadrático de asignación). En general, las taxonomías más abundantes se realizan por la forma de generar las diferentes soluciones, por la técnica empleada para la colocación de las actividades en sus posiciones o por la naturaleza de la técnica empleada para resolver el problema [Santamarina, 95; González-Cruz, 01; Ontiveros, 05]. Otras clasificaciones posibles son: la realizada en función del empleo de funciones objetivo que consideren criterios cualitativos, cuantitativos o de ambos tipos, del carácter multicriterio o no del método [González-García, 05], o de la dimensionalidad del dominio de ubicación (modelos meramente topológicos, lineales, bidimensionales o tridimensionales con la consideración de varias alturas de planta [Heragu, 97]).

En el presente trabajo se presentará una doble clasificación siguiendo la línea de [Santamarina, 95]. Estas clasificaciones se realizarán:

- por el modelo espacial empleado para situar las actividades en el dominio de ubicación, y
- por la técnica empleada para solucionar el problema.

### **2.7.1 Clasificación de las técnicas por el modelo espacial empleado para situar las actividades en el dominio de ubicación**

Dar solución a un problema de distribución en planta implica definir la situación de las diferentes actividades en el dominio de ubicación. La definición de la situación de cada actividad puede ser más o menos precisa, sus formas más o menos compactas o disgregadas, el dominio de definición puede ser constar de una única planta o de varias...; en definitiva, existen diferentes modelos geométricos y las técnicas de resolución del problema de distribución pueden clasificarse en función de cuál adoptan.

Como se indica en [González-García, 05] una posible clasificación dividiría las técnicas en dos grandes grupos según adopten dos tipos de modelos: los modelos topológicos y los modelos geométricos. Los modelos geométricos a su vez pueden clasificarse según la dimensionalidad del dominio de ubicación en unidimensionales, bidimensionales, multiplanta y tridimensionales (Figura 2.21). Los modelos bidimensionales y multiplanta pueden dividirse, además, según que el problema se formule discretizando el dominio global en pequeñas unidades de área, o que el espacio asignado a cada actividad se determine mediante cortes recursivos del dominio. Al primer tipo se le denomina modelo discreto y al segundo modelo continuo. A estos dos habría que añadir un tercer tipo de modelo que emplea técnicas

analíticas para la colocación de las actividades.

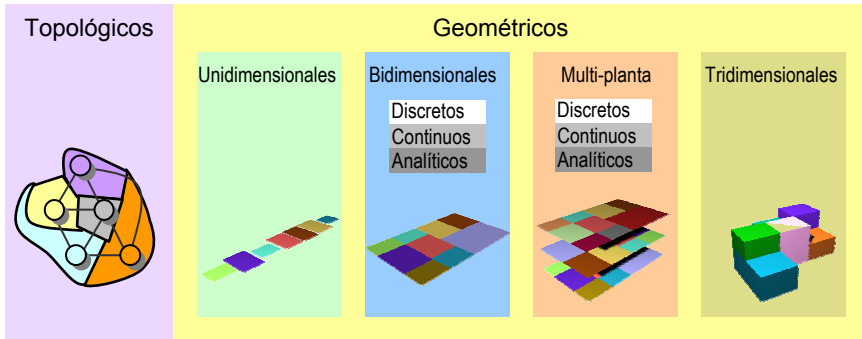


Figura 2.21: Clasificación de los modelos espaciales empleados por las técnicas de resolución del problema de distribución en planta.

### 2.7.1.1 Modelos topológicos

Los modelos topológicos no proporcionan una definición exacta de la distribución de las actividades sino, más bien, una estructura topológica (generalmente representada mediante un diagrama) que considere las relaciones de las actividades. El diagrama topológico de actividades representará una disposición aproximada de las mismas, de manera que se logre evitar los cruzamientos de los recorridos entre ellas, hacer adyacentes aquellas que con más intensidad se relacionan, separar aquellas que lo requieran y, en definitiva, hacer cumplir los principios de la distribución en planta (Figura 2.22). En ningún caso se considera el área o la forma de la superficie requerida por las actividades. El paradigma de modelo topológico se da en las técnicas basadas en la Teoría de Grafos.

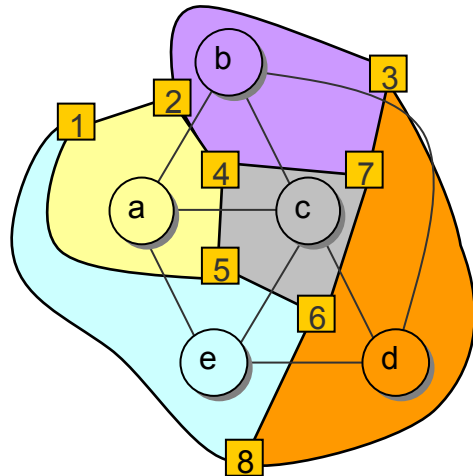


Figura 2.22: Diagrama topológico de actividades.

#### 2.7.1.1.1 Teoría de grafos

La primera aplicación sistemática de la teoría de grafos al problema de la distribución en planta la realizan Seppanen y Moore en 1970 [Seppanen et al., 70] (se realizaron algunas aproximaciones previas en [Buffa, 55] y [Levin, 64]). Para conocer más profundamente los fundamentos del procedimiento y una revisión de métodos que lo aplican puede consultarse [Hassan et al., 87]. En general, estos procedimientos no logran asegurar que los



departamentos con relaciones más intensas permanezcan adyacentes [Hassan et al., 87], y las formas de las actividades obtenidas suelen ser irregulares y de baja calidad geométrica.

En la aplicación de la teoría de grafos a la resolución del problema de distribución pueden distinguirse tres etapas:

**Primera etapa:** El diagrama relacional de recorridos y/o actividades [Muther, 68], generado mediante la tabla relacional de actividades, se transforma en un *grafo planar ponderado maximal*. Se dice que un grafo es *ponderado* si a sus aristas se les asocian valores (pesos) que pueden ser empleados como representación de magnitudes (por ejemplo coste o beneficio). Se dice que un grafo es *planar* si es posible representarlo bidimensionalmente de manera que sus aristas se intersecten sólo en los vértices. Se dice que un grafo planar es *planar maximal* si deja de serlo en caso de que se le añada una arista más. Con todo esto, un *grafo planar ponderado maximal* es un grafo planar maximal cuyas aristas tienen los mayores pesos asociados posibles.

En esta primera etapa se considera a las actividades carentes de área, primando en el estudio las relaciones entre actividades sobre la geometría y área de las mismas. Los nodos del grafo representan las actividades, y las aristas con sus pesos asociados las intensidades relacionales entre actividades. Dado que para formar un grafo planar el número de aristas que unen los nodos es limitado<sup>9</sup> sólo se mantienen aquellas relaciones de mayor intensidad.

En la Figura 2.23 se representa un diagrama relacional de 5 actividades. El número máximo de aristas que podría tener un grafo planar de 5 vértices es 9 (3·5-6). En la construcción del grafo planar se ha añadido un vértice que representa el exterior de la planta y se ha unido con los vértices exteriores del grafo.

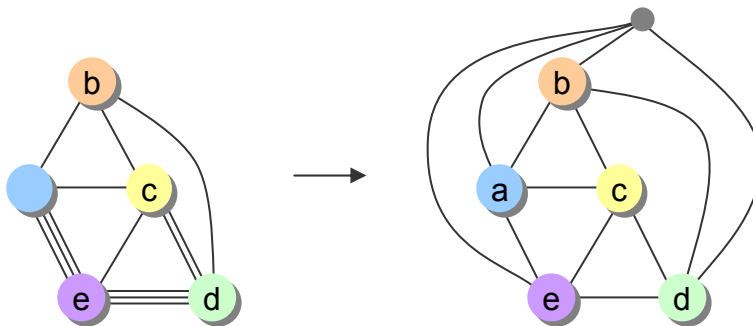


Figura 2.23: Generación de un grafo planar ponderado maximal a partir de un diagrama relacional. Adaptado de [Santamarina, 95].

Para el apoyo a la generación del grafo planar ponderado maximal existen métodos que es posible clasificar en dos grupos: los que verifican la condición de planaridad tras la adición de una nueva arista, y los que evitan tener que realizar la verificación mediante una serie de premisas en el método constructivo empleado. Dentro del primer tipo destacan: el algoritmo

<sup>9</sup> Para respetar la condición de planaridad el número máximo de aristas de un grafo de  $n$  vértices es  $3n-6$ .

presentado en [Carrie et al., 78] que emplea un árbol de expansión maximal, o el de Foulds [Foulds et al., 76] que hace uso de algoritmos de tipo *branch and bound*. Dentro del segundo tipo en [Moore, 76] se emplea una representación del grafo mediante una cadena de símbolos, en [Foulds et al., 78] se propone un método constructivo basado en la creación progresiva de caras triangulares, en [Green et al., 85] se desarrolla un algoritmo de tipo heurístico y una representación matricial del grafo. Destacables también son los algoritmos GASOL [Hammouche et al., 85] y TESSA [Boswell, 92].

**Segunda etapa:** A partir del grafo planar ponderado maximal se construye el *grafo dual*. El procedimiento consiste en colocar un vértice en cada cara del grafo planar y conectar con una arista los diferentes pares de vértices cuyas caras tienen arista común. De esta manera se obtiene un nuevo grafo denominado *grafo dual* del original. Considerando ambos grafos de manera conjunta se aprecia que cada vértice del grafo original (actividad) queda rodeado por las aristas del grafo dual, intuyéndose ya un posible layout (sin control formal de ningún tipo). En la Figura 2.24 puede apreciarse que se ha introducido un vértice ficticio exterior en el grafo dual (el 8), necesario para que todas las actividades del grafo queden inscritas entre las aristas del grafo dual.

**Tercera etapa:** En esta última etapa se consideran por fin los aspectos geométricos del problema (área y forma). A partir del grafo dual se debe obtener una distribución representada por un diagrama de bloques o layout de bloques. Este proceso no es sistemático, necesitando de continuos ajustes de las diferentes soluciones que es posible obtener de un mismo grafo dual (Figura 2.25). Los algoritmos desarrollados para esta etapa son menos abundantes que los dirigidos a generar el gráfico planar ponderado maximal, y entre ellos cabe destacar los propuestos por Hassan y Hogg [Hassan et al., 89; Hassan et al., 91] que emplean algoritmos constructivos similares a los clásicos ALDEP o CORELAP.

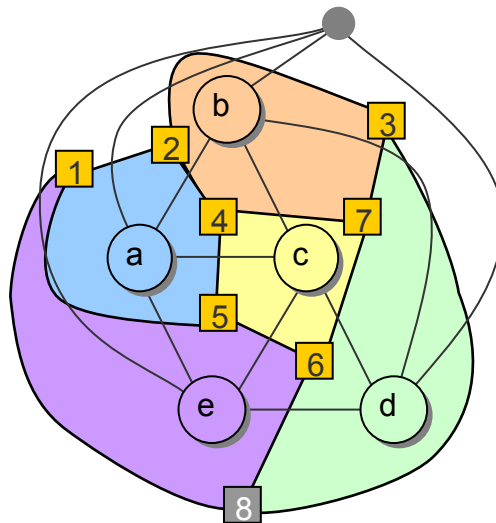


Figura 2.24: Construcción de un grafo dual e introducción de una actividad exterior ficticia). Adaptado de [Santamarina, 95].

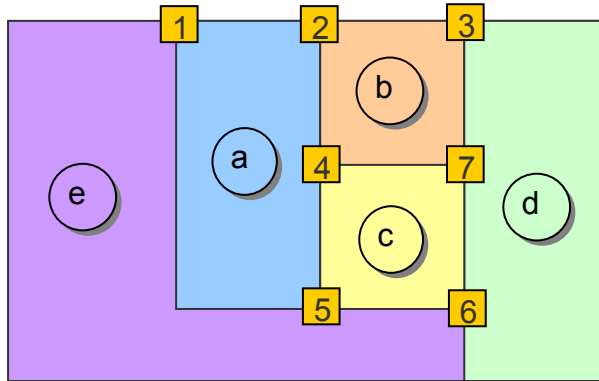


Figura 2.25: Transformación del grafo dual en un layout de bloques. Adaptado de [Santamarina, 95]

### 2.7.1.2 Modelos geométricos

La mayor parte de las técnicas de resolución del problema de distribución emplean este tipo de modelos en la ubicación de las actividades. Los modelos geométricos consideran que las actividades no son simples entelequias adimensionales, sino que se les debe asignar una superficie con un área mínima y con ciertas restricciones en cuanto a la forma.

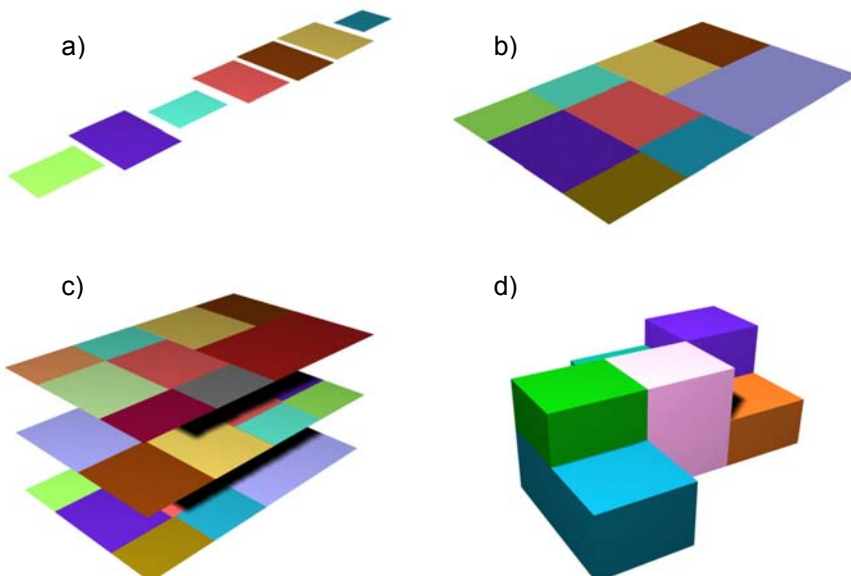


Figura 2.26: Modelos geométricos (a) unidimensionales, (b) bidimensionales, (c) multiplanta y (d) tridimensionales.

Los modelos geométricos pueden ser clasificados (como propone [González-García, 05]) en función de la dimensionalidad del dominio de ubicación. Según esta clasificación los modelos pueden ser unidimensionales, bidimensionales, multi-planta y tridimensionales.

Los modelos **unidimensionales** plantean el problema como la secuenciación de las actividades en una única alineación (Figura 2.26 a) o en varias líneas paralelas, lo cual corresponde a una disposición que se da con cierta frecuencia en la realidad. Las actividades poseen áreas diferentes y en la evaluación se considera el flujo de materiales entre ellas. Modelos de este estilo se emplean en [Simmons, 69] y en [González-Cruz, 01]. En el primer caso se utiliza un algoritmo *branch and bound* en la resolución y no se considera ningún tipo de restricción en cuanto a la colocación de determinadas actividades a posiciones concretas. En el caso de González-Cruz, la resolución del problema se realiza mediante un método derivado de una estrategia de resolución de problemas basada en la Teoría de las Dimensiones del Proyecto [Gómez-Senent et al., 97].

En [Heragu et al., 92] se propone un algoritmo basado en recocido simulado que obtuvo soluciones óptimas para 6 de 8 problemas de test de una sola línea, mejorando las soluciones conocidas para los dos restantes. Este mismo algoritmo logró muy buenos resultados en problemas multi-línea, incluidos algunos de los conocidos problemas de Nugent [Nugent et al., 68].

Los modelos **bidimensionales** son aquellos en los que el dominio de ubicación sobre el que se sitúan las actividades es una única superficie plana (Figura 2.26 b). La mayor parte de los métodos descritos en la bibliografía emplean modelos bidimensionales. Dado que el presente trabajo se centra en este tipo de modelos, se realizará una amplia descripción de métodos que lo emplean en apartados posteriores.

El modelo **multi-planta** (multi-floor) considera el dominio de ubicación como varias superficies a distintos niveles, es decir, como varias plantas de un mismo edificio (Figura 2.26 c). Una revisión de métodos que emplean este modelo puede encontrarse en [Meller et al., 97]. En algunos casos se trata adaptaciones de los métodos bidimensionales, en los que se introduce una fase previa de selección de la planta en la que se ubicará cada actividad (métodos en dos fases). Los métodos en una fase, al contrario, permiten que las actividades varíen la planta a la que son asignadas durante la ejecución del algoritmo. Al primer tipo pertenece el método HGA [Lin et al., 00] en el que tras haber seleccionado la planta de cada actividad, un algoritmo genético distribuye las actividades dentro de sus niveles correspondientes. El método ALDEP puede ser empleado con modelos multi-planta como indican sus autores en el mismo artículo en el que definen el método [Seehof et al., 67], sin embargo, en éste no queda muy claro como se realiza la asignación de las actividades a las plantas, y se ignora el tráfico de materiales entre los diferentes niveles durante la evaluación. SPS [Liggett et al., 81], plantea la primera fase de asignación de actividades a plantas como un problema cuadrático de asignación y lo resuelve mediante procedimientos heurísticos. Este método permite que el área asignada a una actividad esté dividida en diferentes plantas. En la segunda fase se emplea de nuevo una formulación como problema cuadrático de asignación para determinar el layout de cada planta de forma independiente.

SPACECRAFT [Johnson, 82] es un método en una fase derivado de otro que emplea modelos bidimensionales, en este caso el CRAFT. SPACECRAFT es un método de mejora basado en el intercambio de la posición de actividades adyacentes o de igual tamaño a partir

de una solución inicial. En este caso se considera el costo del movimiento de los materiales entre las diferentes plantas, sin embargo, las actividades pueden ser divididas en distintos niveles, y los intercambios de actividades están limitados a aquellos que involucran actividades adyacentes o de igual área.

Este último problema es solventado por otros métodos empleando *curvas de llenado de espacios* (llamadas en inglés *Spacefilling Curves* y que serán tratadas más adelante) para la colocación de las actividades. Entre ellos MULTIPLE [Bozer et al., 94], basado en CRAFT, introduce el control de forma de los departamentos y permite el intercambio de cualquier par de actividades, incluso entre plantas diferentes, sin permitir que una actividad quede distribuida en dos niveles. SABLE [Meller et al., 96a] algoritmo en una única fase, emplea también curvas de llenado de espacios para colocar las actividades y logra generalizar el intercambio de actividades. Genera una solución inicial mediante una lista de candidatos a entrar en la distribución que va asignando a los diferentes niveles. La solución inicial es mejorada con intercambios de departamentos. Meller y Bozer, los autores de MULTIPLE y SABLE, crearon STAGES y FLEX [Meller et al., 97], procedimientos en dos fases que emplean curvas de llenado de espacios.

Otras propuestas destacables en el ámbito de la distribución multi-planta son MULTI-HOPE [Kochhar et al., 98] que discretiza el recinto en trozos iguales de una determinada área y asigna a cada actividad el número de trozos necesarios para albergarla, y la presentada en [Lee et al., 05], que emplea un algoritmo genético que representa las soluciones mediante cromosomas con cinco segmentos. Las relaciones entre las instalaciones, corredores y elevadores son representados mediante un gráfico de adyacencia.

Los métodos multi-planta presentados hasta el momento emplean técnicas discretas. Existen otros métodos basados en modelos continuos de división del dominio de ubicación como por ejemplo LOGIC [Tam, 92a] y MUSE [Matsuzaki et al., 05], algoritmos basados en árboles de corte que permiten obtener formas rectangulares para las actividades. La forma de actuación de las técnicas que emplean modelos discretos, continuos o analíticos será tratada en los siguientes apartados.

Por último, los modelos geométricos **tridimensionales** son los menos presentes en la bibliografía. Consideran el dominio de ubicación como tridimensional (Figura 2.26 c). Como ejemplo, un método que emplea este modelo es el expuesto en [Barbosa-Povoa et al., 02].

### 2.7.1.3 Modelos discretos

Como se ha indicado en apartados precedentes, los modelos bidimensionales y multi-planta, pueden subdividirse a su vez en modelos discretos, continuos y analíticos. Las técnicas que formulan el problema de la distribución en planta bajo modelos discretos, parten de una subdivisión del dominio de ubicación en una retícula de subdominios de igual área. Las actividades serán situadas en el dominio asignándoles el número suficiente de subdominios para cubrir sus necesidades espaciales.

El problema puede plantearse de la siguiente manera:

*Dado un dominio  $D$ , de área conocida  $A$  y geometría conocida o desconocida, el problema consiste en ubicar en él, sin solapamiento,  $m$  actividades de área conocida  $a_i$  y*

geometría libre  $D_i(a_i)$ , entre las que existe una serie de relaciones que hacen preferible o no su cercanía.

Es necesario resaltar, que en este tipo de modelos las actividades no poseen restricciones formales, es decir, no se define a priori la forma, ni el ratio de aspecto ni algún otro tipo de limitación en cuanto a geometría.

El dominio se *discretiza* dividiéndolo en una retícula de  $m$  subdominios elementales de área  $a$ , cumpliéndose que  $A = m \cdot a$ , produciéndose la siguiente transformación:

$$D(A) \rightarrow D(n, a)$$

$$D_i(a_i) \rightarrow D_i(n_i, a) / a_i = n_i \cdot a$$

Así pues, el dominio se transforma en un conjunto de  $n$  ubicaciones a las que se debe asignar las  $m$  actividades. A cada actividad  $i$  se le asociará un conjunto de celdas  $S_i$  sobre las que se distribuirá, denominado *conjunto de asignación*. Dado que el dominio está discretizado, es posible establecer una *matriz de distancias* que

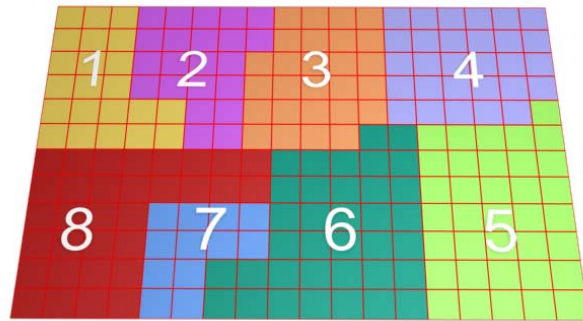


Figura 2.27: Ejemplo de solución obtenida mediante técnicas discretas.

recoja las distancias (medidas mediante la métrica que se establezca) que existe entre las diferentes casillas en que se ha dividido el dominio.

Además es posible definir una variable de asignación  $x_{ik}$ , cuyo valor será 1 si la actividad  $i$  ha sido asignada a la ubicación  $k$ , y que valdrá 0 en caso de que no sea así. Con el conjunto de estos valores puede formarse la *matriz de asignación*, que contiene la información referente a la posición ocupada por cada actividad.

A partir de la *matriz de distancias* que indica la distancia entre ubicaciones, la *matriz de asignación* que indica la ubicación de cada actividad, y la necesidad de cercanía o lejanía de las actividades, es posible evaluar la calidad de cada una de las posibles configuraciones del sistema (soluciones). El objetivo perseguido es localizar aquella configuración del sistema, representada por la *matriz de asignación*, que optimice la función objetivo bajo los diferentes criterios que se establezcan.

A la formulación del problema deben añadirse las restricciones necesarias, por ejemplo: que el número de subdominios asignados a cada actividad sea suficiente para cubrir sus necesidades de espacio, que no exista superposición, es decir, que una misma casilla no esté asignada a más de una actividad, y las restricciones geométricas necesarias, entre las que es fundamental la de no disgregación de las actividades, es decir, que una actividad sea asignada a celdas contiguas.

La mayor parte de los métodos bidimensionales y multi-planta emplean el modelo discreto, por ejemplo: CRAFT [ Armour et al., 63], CORELAP [ Lee et al., 67], ALDEP [ Seehof et al., 67], PLANET [ Apple et al., 72], MULTIPLE [ Bozer et al., 94] o SABLE [ Meller et al., 96a], así como muchos de los métodos basados en metaheurísticas.

### 2.7.1.3.1 Curvas de llenado de espacios

Como se ha indicado al tratar el tema de los modelos multiplanta, muchos de los métodos de resolución que emplean modelos discretos, como MULTIPLE o SABLE, usan las llamadas *Spacefilling Curves* para asignar las actividades a los diferentes subdominios. El proceso consiste en determinar, por algún procedimiento, la secuencia en la que las actividades serán introducidas en el dominio. Una vez obtenida dicha secuencia, éstas son colocadas en el dominio siguiendo el recorrido marcado por la curva de llenado de espacios. La curva recorre el dominio asignando tantos subdominios a las actividades como requieran (Figura 2.28 a). Una vez que se ha colocado la primera actividad se sitúa la siguiente de la secuencia ocupando los subdominios necesarios. Este proceso continúa hasta finalizar la secuencia. Generar un nuevo layout es tan sencillo como variar el orden de la secuencia de introducción de las actividades (Figura 2.28 b). En [Bozer et al., 94] puede encontrarse un análisis del impacto de la forma de las curvas de llenado de espacios sobre el layout

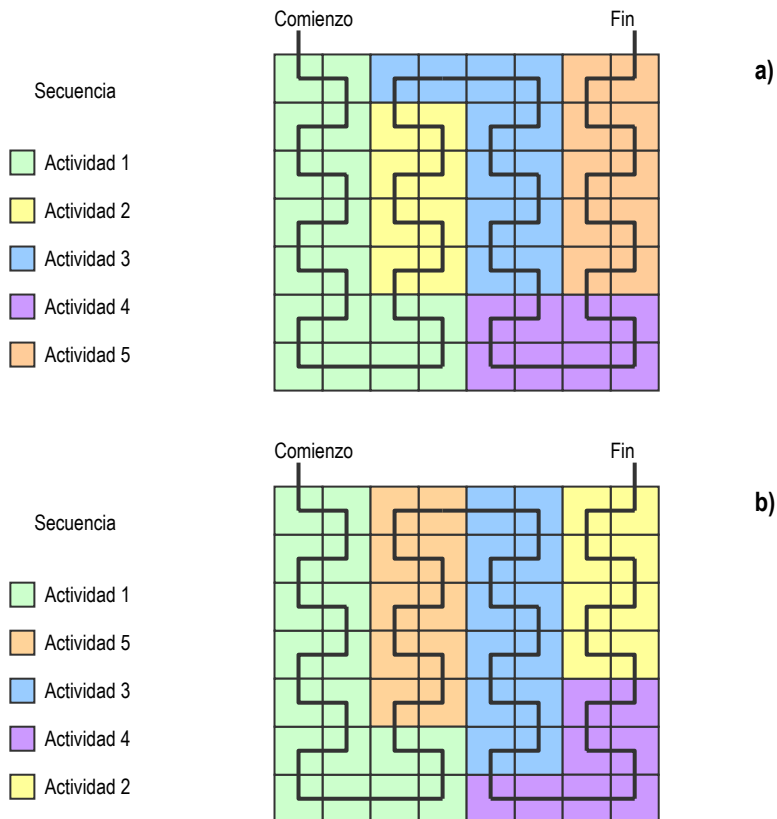


Figura 2.28: Curvas de llenado de espacios e intercambio de actividades en la secuencia de actividades.

generado.

### 2.7.1.3.2 El control de la agregación en los modelos discretos

La calidad formal de las soluciones encontradas por los diferentes algoritmos debe ser controlada, para que la forma asignada a las instalaciones satisfaga las necesidades de espacio de cada actividad. En general el área asignada será la necesaria para cada actividad, sin embargo la forma de dicho espacio puede hacer imposible la implementación de la solución. Existen diferentes formas de medir la calidad de la forma de las actividades de una determinada solución que serán tratadas más adelante.

En los modelos discretos puede ocurrir que el espacio asignado a una actividad esté desagregado, es decir, separado en dos o más zonas diferentes del dominio. En estos modelos debe implementarse algún mecanismo de control de la agregación. Entre estos modelos se cuentan el *algoritmo de etiquetado* y el *algoritmo de la matriz de conectividad*.

El primero es empleado fundamentalmente en el tratamiento de imágenes almacenadas como mapas de bits. Puede establecerse cierta analogía entre un mapa de bits y una distribución obtenida mediante un modelo discreto. Cada una de las celdas correspondería a uno de los píxeles que conforman la imagen y la actividad a la que pertenece dicha celda sería el color de dicho píxel. Para cada actividad de la que se quiera comprobar la integridad formal, se recorre celda a celda el dominio de arriba abajo y de izquierda a derecha, comprobando si las celdas aledañas a la actual pertenecen a la misma *actividad padre*, y etiquetando las celdas que pertenecen a dicha actividad. Finalizado el recorrido a cada celda de la actividad que se está analizando le corresponde una etiqueta y es posible establecer el número de fragmentos en que se ha disgregado la actividad. El segundo método emplea una matriz de valores binarios que indica la conectividad de cada una de las celdas de una actividad con las demás.

### 2.7.1.4 Modelos continuos

De manera general los modelos continuos construyen las diferentes distribuciones de las actividades en el dominio mediante el corte recursivo del mismo. Las técnicas que emplean modelos continuos suelen proporcionar un gran control de la geometría de las actividades y un elevado aprovechamiento del espacio de la planta evitando las áreas sin asignar. El planteamiento matemático es el siguiente:



Figura 2.29: Solución obtenida mediante técnicas de corte.

*Dado un dominio  $D$ , de área conocida  $A$  y geometría conocida, el problema consiste en ubicar en él, sin solapamiento,  $m$  actividades de área conocida  $a_i$  y geometría flexible  $D_i(a_i)$ , entre las que existe una serie de relaciones que hacen preferible o no su cercanía, de modo que la distribución sea óptima bajo los criterios establecidos para su evaluación.*



Las actividades tienen forma rectangular y geometría flexible, lo que significa que el ratio entre la altura y la anchura del área asignada a la actividad puede variar dentro de ciertos márgenes (restricciones geométricas). En la Figura 2.30 puede observarse las formas que puede adoptar una actividad de geometría flexible; el área de la actividad se mantiene mientras la relación entre el alto y el ancho de la actividad varía entre ciertos límites.

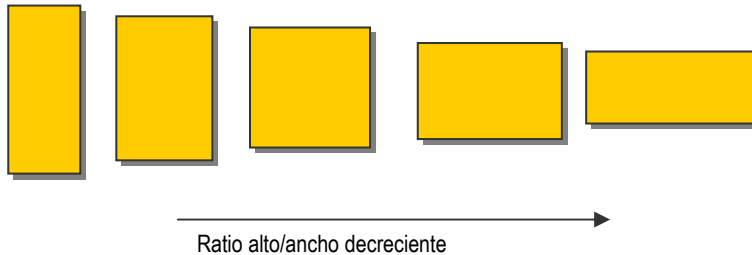


Figura 2.30: Actividad de geometría flexible.

Aunque existen otras formas de implementar los modelos continuos (como las matrices de localización [Kim et al., 98]), este trabajo se centrará en las más habituales, las que emplean árboles de corte (slicing trees) y los modelos de bahías flexibles (flexible bay).

#### 2.7.1.4.1 Árboles de corte

Los árboles de corte como forma de representación de la distribución en planta, aparecen en el inicio de la década de los 80 del siglo pasado tal y como se recoge en [Tam, 92a] y [Tam, 92c]. Dado que las distribuciones pueden construirse por cortes recursivos del dominio de ubicación, éstas pueden ser representadas como una secuencia o estructura de cortes. Cada partición rectangular en la estructura de cortes corresponde al espacio destinado a cada departamento. En general los cortes se realizan en dos direcciones habitualmente paralelas a los ejes del sistema de referencia fijado. Lo más común es emplear cortes verticales y horizontales, aunque es posible definir otros tipos como los cortes en "L" propuestos por Tam en [Tam, 92c].

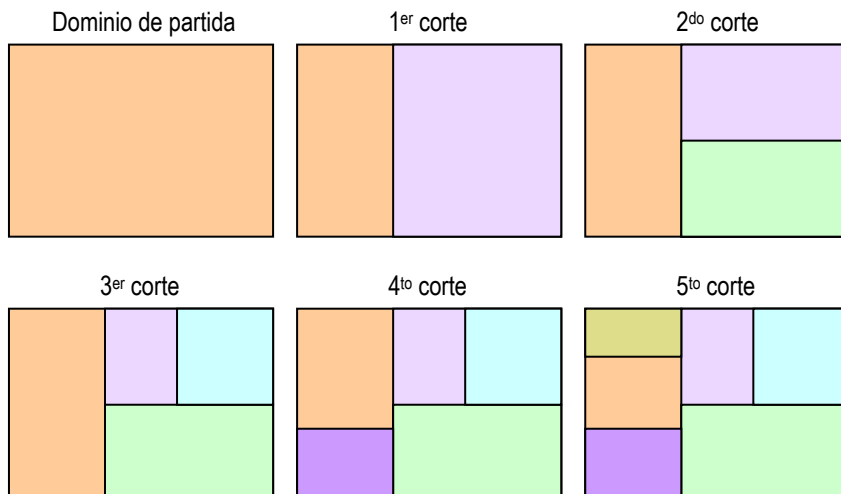


Figura 2.31: Construcción de una distribución por cortes recursivos del dominio.

Así pues, para generar las soluciones se van realizando los cortes al dominio según las direcciones establecidas, quedando las diferentes actividades a un lado u otro del corte realizado. Para decidir qué actividades quedarán a cada lado debe realizarse previamente un proceso de agrupación de las mismas en función de sus afinidades. Realizar este agrupamiento de manera conveniente resulta fundamental dado que determinará de manera decisiva la distribución final de las actividades. Esta agrupación debe llevarse a cabo de manera que las actividades que lo requieran permanezcan adyacentes, o al menos cercanas, en la distribución final, y alejadas aquellas a las que les es preceptivo.

Por ejemplo, en la Figura 2.32, se realiza inicialmente un corte vertical que divide el dominio en dos subdominios. Las actividades que forman la distribución quedan a un lado u otro del corte en función de la agrupación que se haya hecho previamente de las mismas. El corte se lleva a cabo en una posición tal que deja suficiente espacio a ambos lados como para albergar las actividades correspondientes. Las actividades que quedan a cada lado del corte son posteriormente vueltas a separar por nuevos cortes hasta generar la distribución definitiva.

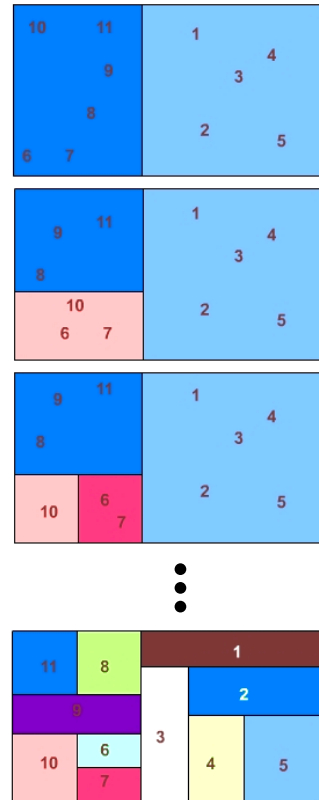


Figura 2.32: Generación de una distribución mediante sucesivos cortes del dominio de ubicación.

Para realizar la agrupación se pueden emplear diversas técnicas. Por ejemplo, en las primeras fases de las técnicas basadas en teoría de grafos, las agrupaciones topológicas son realizadas en función de las afinidades de las actividades (ver 2.7.1.1.1). El grafo planar ponderado maximal calculado es, precisamente, un intento de hacer adyacentes aquellas actividades con una mayor intensidad relacional.

Otra posibilidad es emplear un algoritmo metaheurístico en la búsqueda de la agrupación óptima. En el método LAYAGEN en dos fases presentado por Santamarina [Santamarina, 95], la primera de las fases es precisamente la búsqueda de la agrupación más conveniente de las actividades mediante un algoritmo genético. En [Tam et al., 98] es también un algoritmo genético el que busca la estructura de cortes más adecuada.

Las técnicas de agrupamiento (*clustering*) basadas en análisis multivariante son las más tradicionales. Las técnicas de *clustering* analizan la afinidad entre actividades evaluando la distancia existente entre ellas, y agrupándolas en función de dicha distancia. En este caso la distancia será una función inversa de la intensidad relacional, es decir, la distancia será menor cuanto mayor sea la intensidad relacional. Por ejemplo, Tam propone como medida de la distancia entre dos actividades  $i$  y  $j$ :

$$d_{ij} = \frac{1}{1 + w_{ij} + w_{ji}}$$

donde  $w_{ij}$  y  $w_{ji}$  es el flujo de materiales entre las actividades. Con estas distancias es posible formar un *matriz de distancias*  $D$ , que representa la distancia existente entre cada par de actividades.

Una vez establecidas las distancias se procede al agrupamiento. En el caso de Tam, procede agrupando inicialmente las dos actividades más cercanas entre sí. Tras ello el grupo formado pasa a ser considerado como una actividad, recalculándose su distancia a cada una de las actividades restantes y modificando en consecuencia la matriz de distancias. El procedimiento continúa agrupando de nuevo aquellas actividades/grupos más cercanos entre sí.

Para un problema de  $n$  actividades, deberán realizarse  $n-1$  agrupamientos. El recálculo de las distancias se llevará a cabo cada vez que se cree un grupo. Para calcular la distancia a un grupo de actividades existen diversas métricas: encadenamiento simple, encadenamiento completo, centroide, *group average*, etc. Tam emplea el *group average* como medida de la distancia entre cualquier actividad no agrupada,  $a$ , y un grupo,  $g$ , formado por la unión de dos elementos  $i$  y  $j$  que pueden ser actividades o *clusters* ya formados. La nueva distancia se calcula como:

$$d_{a(ij)}^2 = \frac{n_i}{n_i + n_j} d_{ai}^2 + \frac{n_j}{n_i + n_j} d_{aj}^2$$

donde:

$n_i$  es el número de actividades que conforman el grupo  $i$ ;

$n_j$  es el número de actividades que conforman el grupo  $j$ ;

$d_{ai}$  es la distancia entre la actividad  $a$  y la actividad o grupo de actividades  $i$  antes de la fusión y

$d_{aj}$  es la distancia entre la actividad  $a$  y la actividad o grupo de actividades  $j$  antes de la fusión.

El mostrado es el procedimiento empleado por Tam. Existe otro tipo de algoritmos de clustering que pueden clasificarse en función de la estrategia de agrupación. Los **aglomerativos** son aquellos que parten de un número determinado de clases o grupos individuales que van siendo fusionados para obtener grupos cada vez más poblados. Los **divisivos**, parten de un conjunto de clases o grupos que se van dividiendo en clases cada vez más pequeñas y numerosas. Otra posible clasificación es en función de los criterios empleados para realizar el agrupamiento o división. Así las técnicas **politéticas** deciden las fusiones o divisiones en función de un conjunto de caracteres o criterios, mientras que las **monotéticas** deciden en función de un solo criterio. Bajo esta perspectiva el modelo empleado por Tam sería aglomerativo monotético, dado que la distancia es medida únicamente bajo el prisma del flujo de materiales entre actividades.

Una forma clásica de representar las afinidades entre actividades es mediante un diagrama denominado *dendograma* que refleja las diferentes etapas seguidas durante el

proceso de agrupamiento (ver Figura 2.33).

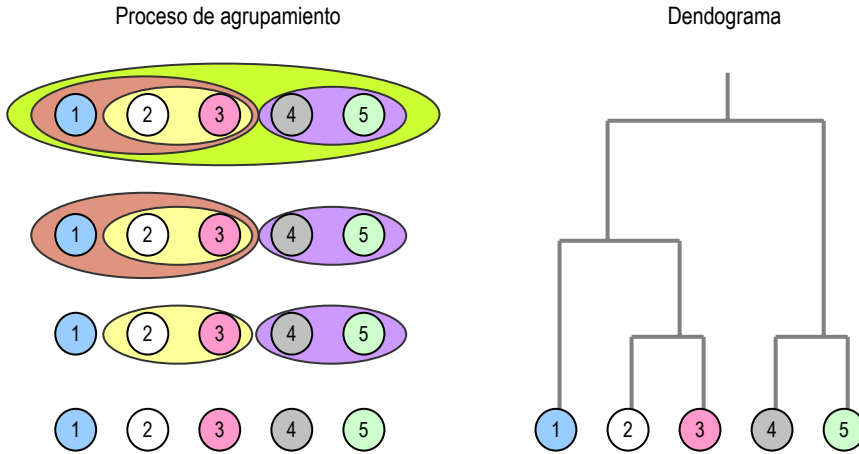


Figura 2.33: Proceso de agrupamiento de actividades y dendrograma representativo.

El dendrograma resultante de la agrupación muestra el número de cortes a realizar y el lado del corte en el que debe quedar cada actividad tras el corte correspondiente. Por ejemplo, el dendrograma de la Figura 2.33 indica que tras el primer corte, las actividades 1, 2 y 3 quedarán a un lado, mientras que la 4 y la 5 quedarán al otro.

Para poder generar la distribución a partir del dendrograma es necesario añadir la información referente al modo en que se realizarán los cortes. Añadiendo dicha información al dendrograma obtenemos un árbol de cortes (*slicing tree*). Un árbol de cortes es un árbol binario que representa el proceso de partición que genera la estructura de cortes. Cada nodo interno del árbol representa la forma en la que se realiza el corte, designado mediante una letra. Cada hoja del árbol (nodos extremos de los que no penden otros nodos) representa una actividad identificada mediante un número (Figura 2.34).

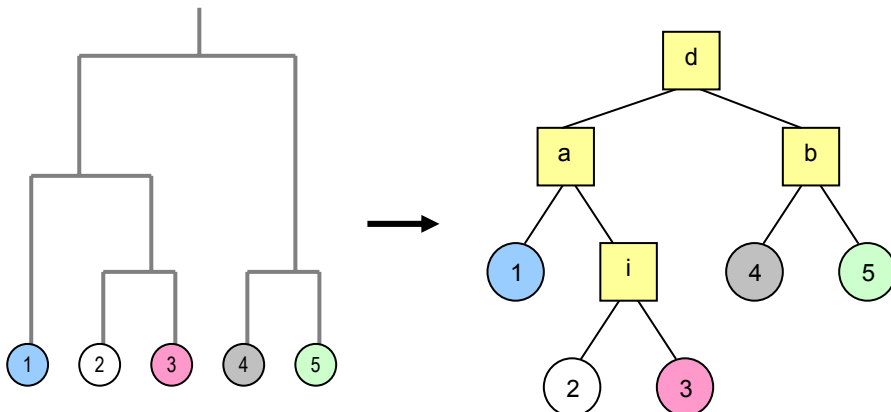


Figura 2.34: Dendrograma + información de cortes → árbol de cortes.

Para distribuir  $n$  actividades es necesario realizar  $n-1$  cortes, por lo tanto el árbol de cortes correspondiente tendrá  $n$  hojas y  $n-1$  nodos internos. La topología del árbol dependerá de la forma en la que se han agrupado las actividades.

Ya se ha dicho que en los nodos internos se indica mediante una letra el tipo de corte a realizar. A estos se les denomina *operadores de corte* y aunque algunos autores hacen otras propuestas, en general, se emplean los cuatro siguientes: corte vertical arriba, corte vertical abajo, corte horizontal izquierda y corte vertical derecha. Para simplificar, se les denomina *arriba*, *abajo*, *izquierda* y *derecha* respectivamente.

El operador *arriba* divide el subdominio correspondiente mediante un corte horizontal, situando las actividades que penden de la rama izquierda del nodo en cuestión en la parte superior del corte, y las que penden de la rama derecha en la parte inferior del corte. El operador *abajo* actúa mediante un corte horizontal, situando esta vez las actividades que penden de la rama izquierda del nodo en la parte inferior del corte, y las que penden de la rama derecha en la parte superior. *Izquierda* y *derecha* aplican cortes verticales, el primero sitúa las actividades del ramal izquierdo en la parte izquierda del corte y a la derecha los del ramal derecho, mientras que el operador *derecha* actúa a la inversa. La forma de operar queda resumida en la Figura 2.35. Los operadores de corte se codifican mediante letras del alfabeto para colocarlas en los nodos. En castellano se emplea el código:

**a:** arriba; **b:** abajo; **i:** izquierda; **d:** derecha

mientras que las siglas habituales en inglés son:

**u:** up; **b:** bottom; **l:** left; **r:** right

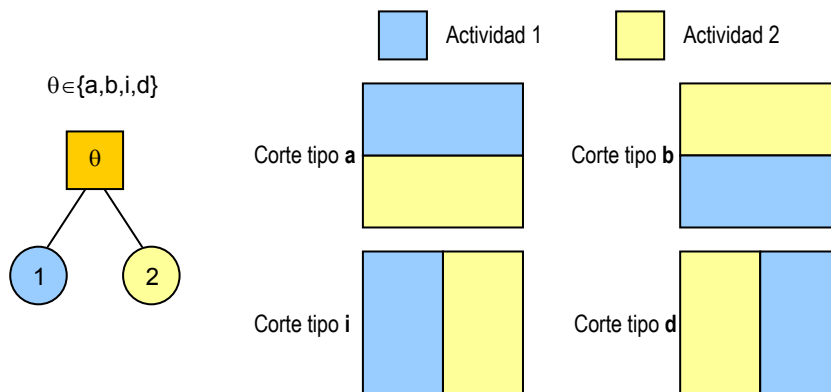


Figura 2.35: Resultado de la aplicación de los diferentes operadores de corte sobre un nodo.

Para componer una distribución a partir de un árbol de cortes dado se procede recorriendo el árbol y realizando los cortes indicados en los nodos, colocando las actividades en los lados correspondientes del corte. Por convención se realiza un recorrido *preorden* del árbol, aunque algunos autores lo proponen *postorden*. Un recorrido *preorden* es aquel en el que se parte del nodo raíz y se visita primero la rama izquierda. Una vez recorrida ésta se

continúa con la derecha. Al llegar a cualquier nodo se sigue el mismo criterio, visitando primero el subárbol izquierdo y después el derecho. Un recorrido de tipo *postorden* sigue el criterio opuesto. Otro tipo de recorridos puede consultarse en [Cohon et al., 91].

En la Figura 2.36 se ejemplifica un recorrido preorden. Se comienza por el nodo raíz marcado como 1 realizando el corte que se indique en dicho nodo. Se desciende hacia el nodo 2; se realiza el corte correspondiente y se visita la actividad que pende en su ramal izquierdo. Se retorna al nodo 2 y se desciende ahora al nodo 3 cortando de la forma que indique dicho nodo. Se recorren las actividades que penden de este nodo comenzando por la izquierda y continuando por la derecha. Tras esto se asciende de nuevo al nodo 3, de éste al 2 y al 1. Desde este punto se realiza el recorrido equivalente por el subárbol derecho.

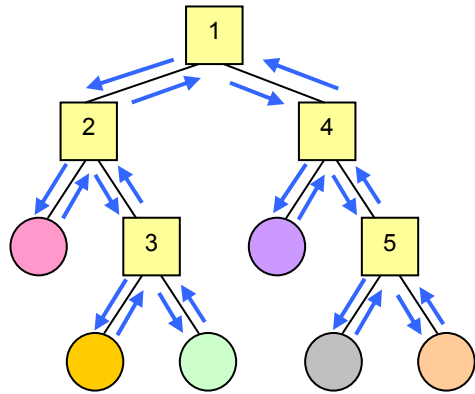


Figura 2.36: Recorrido preorden de un árbol de cortes. Adaptado de [Santamarina, 95].

Al realizar cada corte se debe dejar suficiente espacio en cada subdominio generado como para que quepan las actividades correspondientes. En la Figura 2.37 se puede apreciar la construcción de una distribución mediante un recorrido postorden del árbol.

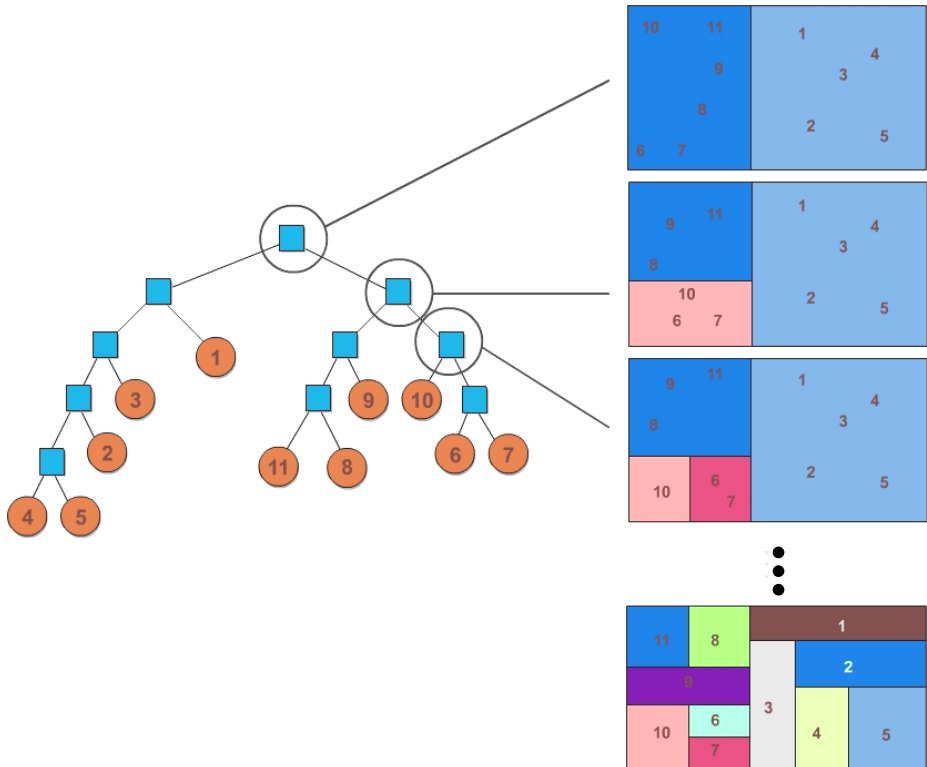


Figura 2.37: Generación de una distribución a partir de un árbol de cortes.

A partir de un mismo árbol de cortes es posible obtener gran cantidad de distribuciones diferentes. Para ello sólo es necesario variar los operadores de corte asignados a cada nodo. Concretamente, el número de configuraciones posibles para un árbol de  $m$  actividades es:

$$N = \left(\frac{p}{2}\right)^{m-1} m!(m-1)!$$

donde  $p$  es la cardinalidad del conjunto de operadores de corte. Por ejemplo, para la distribución de 10 actividades mediante los 4 operadores de corte habituales es posible obtener de un mismo árbol de cortes 6,742 e<sup>14</sup> configuraciones diferentes.

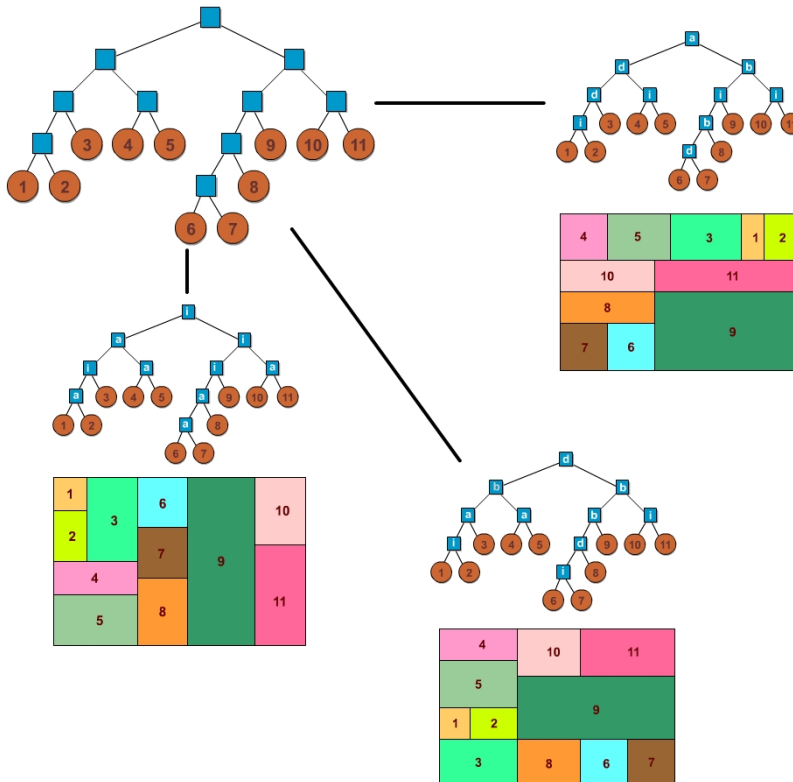


Figura 2.38: Obtención de diferentes distribuciones a partir de un árbol de cortes mediante la modificación de los operadores de corte.

### 2.7.1.4.2 Estructuras de bahías flexibles

La generación de layouts mediante bahías flexibles [Tong, 91], permite la distribución de actividades rectangulares de área desigual en dominios habitualmente rectangulares. Este dominio es dividido en una dirección determinada en “bahías” de anchura variable. Dentro de cada una de estas bahías se coloca un número también variable de actividades que poseerán igual anchura, y altura proporcional al área requerida por cada una. La anchura de la bahía se adapta para acoger a las actividades que contiene (Figura 2.39). El término

*flexible* se refiere tanto a la anchura de las bahías como a su número, dado que éste también puede variar. Es habitual el empleo de heurísticas para la determinación del número de bahías y de la secuencia de actividades que se asignarán a cada bahía [Tate et al., 95; Coit et al., 96].

La formulación del problema mediante estructuras de bahías flexibles limita mucho el espacio de búsqueda de soluciones. Evidentemente sólo serán accesibles las soluciones que puedan ser representadas mediante dicha estructura. Por ejemplo, las soluciones al problema que se pueden obtener deben cumplir que todas las actividades asignadas a una bahía tengan la misma anchura. Como muestra, el espacio de soluciones del problema que es posible explorar mediante árboles de corte

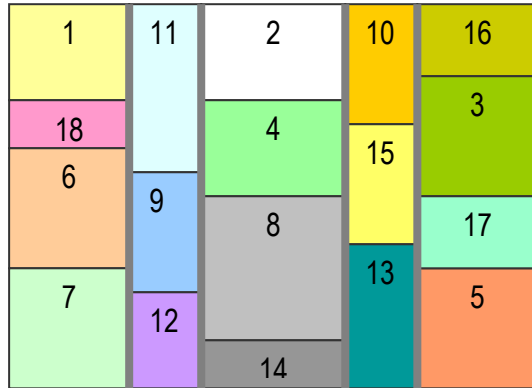


Figura 2.39: Distribución obtenida mediante estructuras de bahía. Las 17 actividades se han distribuido en 5 bahías.

es más amplio que el abordable por bahías flexibles. De hecho, el segundo es un subconjunto del primero; cualquier solución expresable mediante bahías flexibles puede representarse mediante árboles de corte.

Concretamente, el número de configuraciones posibles para un problema de  $m$  actividades es:

$$N = 2^{m-3} m!$$

Recordemos que para la distribución de 10 actividades mediante 4 operadores de corte, es posible obtener de un mismo árbol de cortes 6,742 e<sup>14</sup> configuraciones diferentes, mientras que mediante estructuras de bahías flexibles se pueden obtener 4,644 e<sup>8</sup>.

A pesar de esto, estas estructuras proporcionan beneficios claros en la búsqueda de soluciones viables al problema. La limitación del campo de búsqueda se hace sobre una zona en la que las soluciones existentes son prometedoras desde el punto de vista geométrico, dado que las actividades pueden adoptar geometrías rectangulares con ratios alto/anchura aceptables. Por otra parte la configuración resultante, en la que las actividades son alineadas en las bahías, permite la introducción de pasillos rectos entre las mismas que facilitan el flujo de materiales.

#### 2.7.1.4.3 Space Partitioning Method

Este sistema de generación de layouts fue presentado por Kim y Kim en 1998 [Kim et al., 98] y, en combinación con un algoritmo de recocido simulado ofreció muy buenos resultados en la resolución de algunos problemas tipo de la bibliografía. De hecho, la solución que ofrece al problema de Armour y Buffa [Armour et al., 63] de 20 actividades es tomado como referencia en este trabajo. El algoritmo presentado por estos autores permite un elevado



control geométrico de las actividades, demostrado con la obtención de soluciones al problema antes mencionado, en las que las restricciones geométricas son muy estrictas. Como se podrá comprobar en la fase experimental de este trabajo, el método que se presenta supera las soluciones de Kim y Kim al problema de Armour y Buffa

El Space Partitioning Method representa las soluciones mediante una matriz de dos dimensiones (*Location Matrix*) que contiene información relativa a la posición de las actividades en la planta. El número de elementos de la matriz es igual o superior al de actividades a distribuir. Si es mayor, las actividades excedentes son consideradas ficticias y de área nula.

El método asigna las posiciones y espacios de las actividades en la planta descomponiendo la matriz de forma recursiva, y dividiendo el espacio en bloques rectangulares de acuerdo con los resultados de la descomposición de la matriz. Si la matriz se descompone verticalmente se aplica al dominio un corte vertical, y viceversa para un corte horizontal. Para descomponer la matriz se presentan tres alternativas:

**Método A:** Descomponer la matriz en vectores fila o columna y después descomponer cada vector en actividades individuales.

**Método B:** Descomponer la matriz en dos submatrices una de las cuales es un vector columna o fila, y aplicar luego al método A sobre las submatrices resultantes.

**Método C:** Si la matriz tiene  $f$  filas y  $c$  columnas, existen  $(f + c - 2)$  formas de descomponer la matriz en dos submatrices. Este método selecciona aquella que produce una menor cantidad de actividades que violan las restricciones geométricas. El método B se aplica después recursivamente a las submatrices obtenidas.

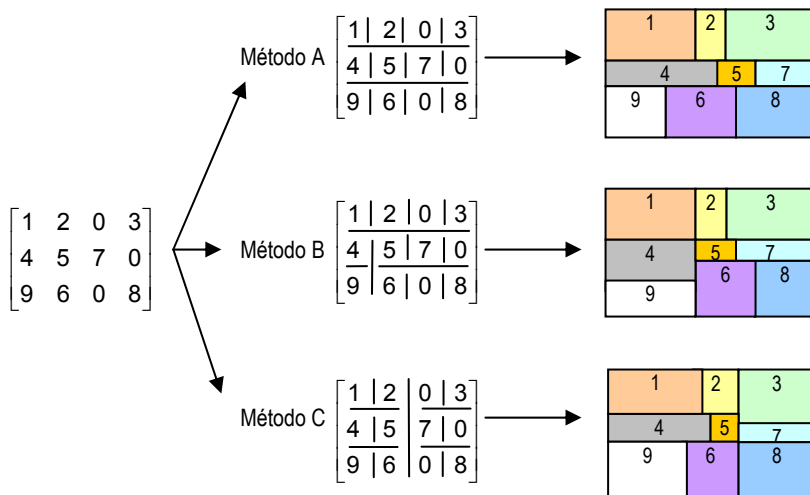


Figura 2.40: Descomposición de la matriz de localización en el Space Partitioning Method de Kim y Kim [Kim et al., 98].

### 2.7.1.5 Modelos analíticos

Se denominará así a los modelos que sitúan las actividades en el dominio referenciándolas a un sistema de coordenadas previamente definido [Heragu et al., 91; Tam et al., 91; Heragu, 92]. Las actividades adoptan generalmente formas rectangulares o cuadradas delimitadas por su ancho ( $a_i$ ) y su alto ( $b_i$ ). La situación de una actividad  $i$  queda

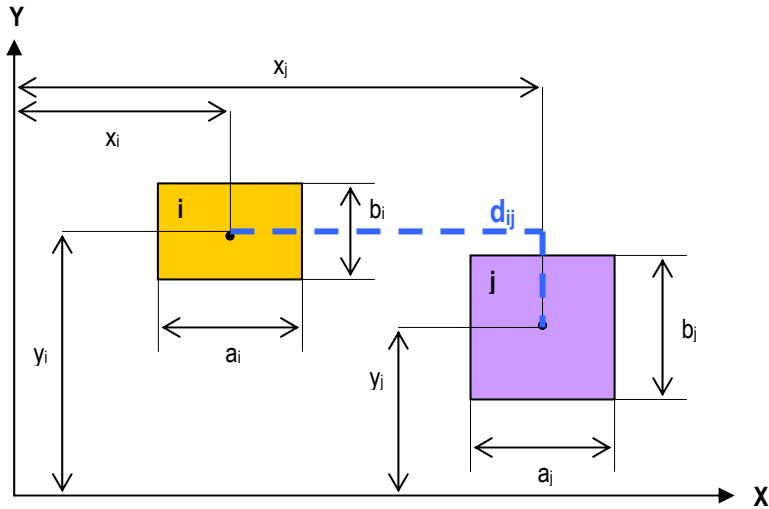


Figura 2.41: Formulación analítica del problema y distancia rectilínea entre actividades. Adaptado de [Santamarina, 95].

definida mediante las coordenadas de su centro de gravedad ( $x_i, y_i$ ) respecto a los ejes del sistema de referencia (Figura 2.41). La distancia entre actividades se mide normalmente (aunque hay otras formas), entre dichos centros de gravedad. En el caso de emplear como medida de la distancia entre las actividades la métrica Manhattan<sup>10</sup>, ésta vendría dada por la expresión:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

La aplicación de un algoritmo de optimización trata de obtener la situación de las actividades óptima desde el punto de vista de los criterios empleados. Estos criterios, plasmados en una función de coste, pueden ser cuantitativos, cualitativos o de ambos tipos. En cualquier caso, siempre deben cumplirse una serie de condiciones para que la solución obtenida sea considerada válida:

**Condición de no superposición:** Es lógico que la distribución de las actividades debe ser tal que no se produzcan solapamientos entre las áreas asignadas a cada una de ellas. Para ello se aplican unas restricciones geométricas que, con la notación empleada

<sup>10</sup> Las formas de medir las distancias entre las actividades una vez situadas en la distribución fue tratada en apartados anteriores.

anteriormente, pueden expresarse, para  $m$  actividades, como:

$$|x_i - x_j| \geq \frac{1}{2}(a_i + a_j) + d_{\min\_ij} \quad i=1, \dots, m-1; j=i+1, \dots, m$$

$$|y_i - y_j| \geq \frac{1}{2}(b_i + b_j) + d_{\min\_ij} \quad i=1, \dots, m-1; j=i+1, \dots, m$$

En estas expresiones  $d_{\min\_ij}$  es la distancia mínima que se desea que exista entre las actividades. Así pues, se garantiza que las actividades no se solapen y que exista siempre una distancia mínima entre ellas si esto es necesario.

**Condición de pertenencia al dominio:** En algunos casos de aplicación de estos modelos no se define un dominio de ubicación como tal, sino que éste será aquél capaz de albergar la distribución resultante. En otros casos existe un dominio de ubicación conocido, con un área determinada y una geometría conocida. Siendo éste un rectángulo con dimensiones vertical y horizontal  $H$  y  $V$  respectivamente, con el vértice inferior izquierdo coincidente con el origen del sistema de referencia escogido, las restricciones que aseguran que las actividades pertenecen al dominio serán:

$$x_i + \frac{a_i}{2} \leq H \quad i=1, \dots, m$$

$$y_i + \frac{b_i}{2} \leq V \quad i=1, \dots, m$$

Por último, puede exigirse a la distribución obtenida que las actividades posean formas determinadas, si es que las actividades se definen como de geometría flexible. Para ello se introducirían restricciones geométricas (por ejemplo ratios de aspecto dentro de un cierto intervalo) o restricciones de orientación de las actividades.

## 2.7.2 Clasificación de los métodos de resolución por la técnica empleada para solucionar el problema

Aunque en la bibliografía es posible encontrar clasificaciones diversas bajo el prisma de este mismo criterio [Santamarina, 95; Meller et al., 96c; González-Cruz, 01; Andrés, 01; Loiola et al., 04; González-García, 05; Ontiveros, 05], en este trabajo se propone la clasificación de los diferentes métodos en función de la técnica empleada para la resolución que se muestra en la Figura 2.42.

Como ya se indicó en el apartado 2.6, el problema de la distribución en planta en sus diversas formulaciones, y cuando el número de actividades supera cierto valor, se convierte en un problema al que es muy difícil encontrar solución (imposible en una praxis operativa y realista). Concretamente, empleando la formulación como problema cuadrático de asignación, y con medios convencionales de cálculo, sólo es posible encontrar soluciones óptimas a problemas con menos de 18 actividades [Kettani et al., 93]. Esto es así si se entiende como solución aquella distribución óptima a la que ninguna otra solución posible puede superar en la forma de evaluación escogida.

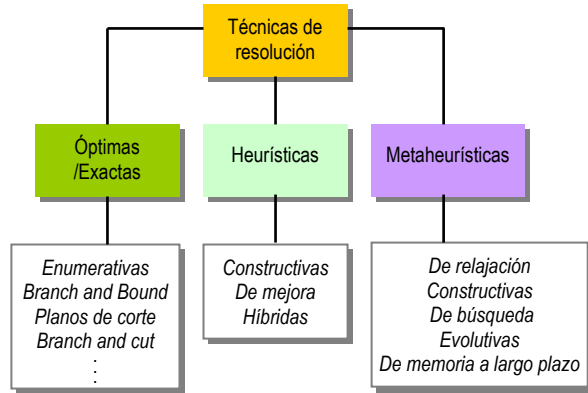


Figura 2.42: Clasificación de los métodos en función de la técnica empleada para la resolución.

Esto condujo necesariamente a la flexibilización del concepto de solución óptima, considerando como tal a la mejor solución que es posible encontrar en un determinado tiempo, y que resulta operativa y aplicable en la práctica. Bajo este nuevo enfoque, las técnicas heurísticas y metaheurísticas ofrecen resultados francamente aceptables y son la mayor parte de los procedimientos que aparecen en la bibliografía a partir de cierto momento [Loiola et al., 04]. Así pues, en principio las técnicas enumerativas o semi-enumerativas eran las predominantes en el intento de obtener soluciones óptimas. Posteriormente, y ante la complejidad del problema aparecerán y prevalecerán hasta la actualidad los métodos heurísticos y más recientemente metaheurísticos.

### 2.7.2.1 Métodos óptimos/exactos

Tratan de obtener la mejor solución global al problema. Son aplicados fundamentalmente a formulaciones del problema como cuadrático de asignación [Koopmans et al., 57] o bien mediante teoría de grafos (ver apartado 2.7.1.1.1). En general las actividades tienen igual área (monoárea) y las posiciones de asignación están fijadas a priori. Algunos de estos métodos son estrictamente **enumerativos**, es decir, tratan de evaluar todas las posibles soluciones al problema, lo cuál, dado el carácter complejo del mismo, los hace absolutamente ineficientes y poco operativos para problemas de cierta envergadura.

Además de estos métodos enumerativos, los destacables en este grupo son los algoritmos de **branch and bound**, los algoritmos de **planos de corte** y combinaciones de estos dos (por ejemplo *branch and cut*). La combinación de métodos *branch and bound* con la programación paralela está produciendo resultados prometedores en los últimos años. Se están resolviendo de forma exacta mediante estos algoritmos problemas tipo de gran envergadura. No obstante, estos éxitos están ligados al empleo de máquinas de gran potencia de cálculo.

### 2.7.2.1.1 Algoritmos branch and bound (ramificación y acotación)

Las primeras referencias a este tipo de algoritmos aplicables a problemas cuadráticos de asignación se pueden encontrar en [Gilmore, 62; Land, 63; Lawler, 63]. En [Loliola et al., 04] se realiza una enumeración exhaustiva de publicaciones que emplean algoritmos de *branch and bound*. Este tipo de algoritmos parten de una solución inicial generalmente obtenida mediante algún algoritmo heurístico. Esta solución inicial, sub-óptima pero factible, es tomada como una cota superior de los posibles valores de la función objetivo. A continuación el problema es separado en un número determinado de sub-problemas (ramificación), estableciéndose una cota inferior para cada uno de ellos que es comparada con la cota superior. Para un problema de minimización (por ejemplo), si una de las nuevas soluciones es factible y su evaluación proporciona un valor inferior a la cota superior, el nodo queda sondeado, es decir, marcado indicando que no es posible encontrar mejores soluciones por ese camino (acotación). Si la solución no es factible se divide de nuevo en subproblemas, repitiéndose de nuevo todo el problema. El proceso finaliza cuando todas las ramas están sondeadas. Estos métodos difieren unos de otros en la elección del límite o cota, en la estrategia de búsqueda, y las reglas y condiciones de eliminación de ramas.

Las técnicas *branch and bound* han evolucionado mucho en los últimos 40 años [Commander, 05]; Gilmore resolvió en 1962 un problema cuadrático de asignación de tamaño 8 [Gilmore, 62]; en el año 2000 Anstreicher y sus colaboradores [Anstreicher et al., 02] fueron capaces de resolver el problema tipo de tamaño 30 de Nugent (nug30).

### 2.7.2.1.2 Algoritmos de planos de cortes

El primer autor en aplicar algoritmos de planos de cortes (cutting plane algorithms) fue Gomory [Gomory, 58; Gomory, 63], haciéndolo sobre problemas modelizados como de programación entera mixta. Éste probó que, tras el número suficiente de iteraciones, el algoritmo localiza la solución óptima al problema. Sin embargo la baja eficiencia y la lentitud de convergencia de estos métodos hicieron que cayeran en desuso. El desarrollo de la teoría poliédrica permitió aumentar la eficiencia de estos algoritmos al facilitar la localización de *planos de corte* más adecuados a cada problema. La aplicación de los algoritmos de planos de corte en el ámbito de la distribución en planta comienza al final de la década de los 70 del pasado siglo [Kaufman et al., 78; Bazaraa et al., 79].

En un problema de optimización lineal con muchas restricciones, el procedimiento consiste en calcular la solución óptima para un pequeño subconjunto de ellas (relajación de restricciones). Encontrado dicho óptimo, si es posible localizar restricciones que son cumplidas por el problema original, pero incumplidas por la solución del problema “relajado”, se dice que esas restricciones son *planos de corte* del campo de soluciones del problema. Estas restricciones pueden ser añadidas al problema “relajado”, de manera que se “recorta” el campo de soluciones aproximándolo al del problema original. El procedimiento se repite hasta que el óptimo del problema relajado cumple las restricciones del problema original. Dado que ese óptimo lo es de un espacio de soluciones que incluye al del problema original, será también óptimo del problema original.

### 2.7.2.2 Métodos heurísticos

Como ya se ha indicado (ver 2.6), el problema de distribución en planta es intrínsecamente difícil de resolver de manera óptima. Para la mayoría de los problemas de distribución es imposible encontrar procedimientos exactos de solución que operen en tiempos realistas y con tecnologías asequibles al planificador medio. Como alternativa surgen los procedimientos heurísticos, que proporcionan soluciones factibles aceptablemente buenas, aunque no necesariamente óptimas, en tiempos de cálculo razonables.

Existen diversos intentos de dar una definición de los procedimientos heurísticos; por ejemplo en [Zanakis et al., 81] se puede leer que son:

*“...procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que tienden a ofrecer una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido”*

en [Adenso-Díaz et al., 96] se ofrecen ocho definiciones diferentes de heurística entre las que citamos:

*“Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución”*

Acudiendo al diccionario de la Real Academia de la Lengua Española (edición electrónica en [www.rae.es](http://www.rae.es)) se encuentran las siguientes acepciones<sup>11</sup>:

*(Del griego εὕρησκειν, hallar, inventar).*

1. *adj. Perteneciente o relativo a la heurística.*
2. *f. Técnica de la indagación y del descubrimiento.*
3. *f. Busca o investigación de documentos o fuentes históricas.*
4. *f. En algunas ciencias, manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.*

Como puede comprobarse, es difícil ofrecer una definición exacta de heurística, aunque en general, y sobre todo en la cuarta acepción de la definición de la Real Academia, se denota un cierto sentido de falta de metodología o sistematicidad en los métodos heurísticos. Nada más lejano a la realidad; los métodos heurísticos, y en particular los aplicados a la resolución del problema de distribución en planta, han logrado un elevado grado de desarrollo metodológico y, en muchos casos, los fundamentos de su funcionamiento han sido estudiados y enunciados.

El empleo de los procedimientos heurísticos es conveniente cuando se dan una o varias de las siguientes circunstancias [Adenso-Díaz et al., 96]

- Cuando no existe un método exacto de resolución;
- Cuando no se necesita la solución óptima;

---

<sup>11</sup> *Metaheurística*, un término que emplearemos posteriormente en este trabajo, no viene recogido en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española.

- Cuando los datos son poco fiables;
- Cuando existen limitaciones de tiempo o espacio de almacenamiento a la hora de obtener una respuesta al problema;
- Como un paso intermedio en la aplicación de otro algoritmo.

Desde la década de los 60 en la que aparecen los primeros heurísticos aplicados al problema de la distribución en planta, la evolución de las diferentes técnicas ha llevado a la existencia de innumerables métodos de resolución. Cada uno de ellos es aplicable en circunstancias particulares (más o menos generales), o hace énfasis en determinados aspectos del problema. También son varias las posibles clasificaciones que es posible hacer de las heurísticas. En el presente trabajo se emplea como criterio de clasificación la forma de generar las soluciones, agrupándose los métodos en: métodos constructivos, métodos de mejora y métodos híbridos.

#### 2.7.2.2.1 Métodos constructivos

De manera general los métodos constructivos generan los layouts escogiendo una tras otra las actividades a distribuir, y colocándolas en determinadas posiciones del dominio de ubicación. Un algoritmo, generalmente heurístico, determina el orden en que se seleccionan las actividades y la posición en que se situarán en el dominio según se valoren las relaciones de proximidad. Operando de esta manera se van añadiendo las actividades al dominio de ubicación y se van construyendo las soluciones sin que sea necesario partir de una distribución inicial. Las diferencias fundamentales entre los algoritmos de este tipo estriban en la forma de seleccionar las actividades y en la manera de elegir las posiciones que ocuparán. Algunos métodos constructivos utilizan una función denominada “miope” que añade cada componente a la solución de tal manera que se obtenga el máximo beneficio en cada paso.

A este tipo de algoritmos pertenecen, por ejemplo: HC66 [Hillier et al., 66], ALDEP [Seehof et al., 67], CORELAP [Lee et al., 67], RMA [Muther et al., 70], MAT [Edwards et al., 70], PLANET [Apple et al., 72], LSP [Zoller et al., 72], FATE [Block, 78], SHAPE [Hassan et al., 86], NLT [Van Camp et al., 91] y QLAARP [Banerjee et al., 92]. De manera general, la mayor parte de los métodos basados en técnicas de corte o teoría de grafos y algunos que hacen uso de la lógica difusa pertenecen a este grupo. Se expone a continuación de manera breve el funcionamiento de los más significativos.

#### **Aldep**

El método ALDEP (acrónimo de *Automated Layout Design Program*) fue presentado por Seehof y Evans en [Seehof et al., 67]. Esencialmente actúa colocando las actividades secuencialmente en el dominio siguiendo una curva de llenado de espacios (2.7.1.3.1) que puede seguir trayectorias diversas: comenzando por cualquier esquina de la planta, zigzagueando vertical u horizontalmente, etc.

Habitualmente el primer elemento de la secuencia se escoge aleatoriamente, los restantes se escogen usando como criterio las relaciones entre actividades expresadas en la Tabla Relacional de Actividades (obtenida a partir del S.L.P.). La siguiente actividad a introducir en la secuencia será aquella cuya necesidad de cercanía a la anterior supere cierto

mínimo establecido como parámetro del algoritmo. De no existir ninguna que cumpla ese requisito se selecciona una actividad de manera aleatoria. Este proceso continúa hasta haber introducido todas las actividades en la distribución.

En una primera iteración se generan tantos layouts como se decida (siendo esta cantidad un parámetro del algoritmo), evaluando cada uno mediante la suma de los valores numéricos de los ratios de proximidad de todos los departamentos adyacentes a uno dado. A esta cantidad se le denomina *total closeness rating* (TCR). Así pues la evaluación se basa en criterios cualitativos, dando valores numéricos a los diferentes ratios de proximidad.

A=64; E=16; I=4; O=1; U=0; X=-1024;

La mejor puntuación obtenida se emplea en la siguiente generación como la mínima aceptable. El proceso continúa hasta que en una generación todos los layouts obtenidos poseen valoraciones inferiores a la mínima aceptable.

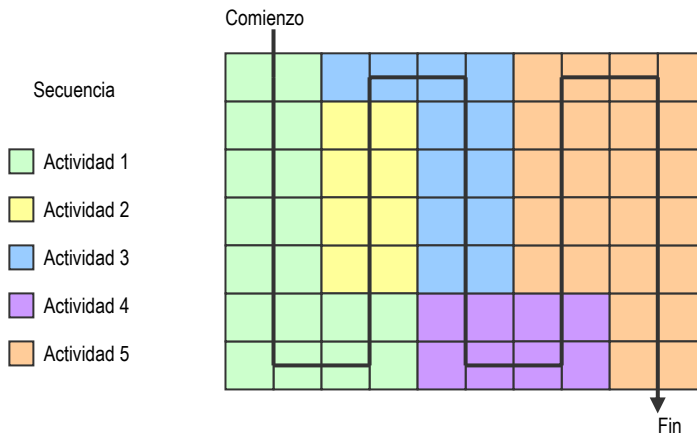


Figura 2.43: Posible estrategia de relleno en ALDEP.

**Corelap**

CORELAP (*Computerized Relationship Layout Planning*) es un procedimiento constructivo que introduce secuencialmente las actividades en la distribución. La primera actividad seleccionada es aquella con un mayor TCR y es colocada en el centro geométrico de la distribución. El criterio para establecer la ubicación adecuada de cada una de las siguientes actividades se basa en el *Índice de colocación* (IC). La ubicación con un mayor IC será la seleccionada. Para una actividad *i* en una distribución en la que *n* actividades están ya colocadas el IC se define como:

$$IC_i = \sum_{j=1}^n V(r_{ij}) \cdot L_{ij}$$

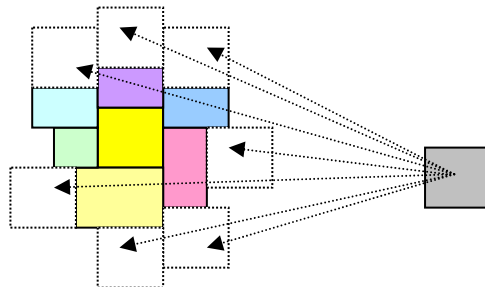


Figura 2.44: Colocación de actividades en CORELAP.



siendo  $V(r_{ij})$  el peso asociado a la intensidad relacional entre la actividad a ubicar  $i$ , y la  $j$ -ésima de las  $n$  ya colocadas, y  $L_{ij}$  es la longitud de contorno común a las actividades  $i$  y  $j$ -ésima. Cuando existen varias alternativas con igual puntuación se escoge la más compacta, es decir, la inscrita en un rectángulo con menor área.

### **Planet**

PLANET (*Plant Layout Analysis and Evaluation Technique*) realiza la asignación de los recursos espaciales en tres etapas. En la primera etapa se establece el coste del flujo de materiales entre las actividades. Cada actividad lleva asociada un índice de prelación, desde 1 hasta 9 en orden descendente de prioridad para entrar en el layout. En la segunda fase, a partir de estos valores, el flujo entre actividades y el índice de prioridad, se establece un criterio para establecer la secuencia con la que las actividades entrarán en el layout. La tercera fase asigna las ubicaciones a las actividades en el orden establecido en la fase 2.

#### 2.7.2.2.2 Métodos de mejora

Los métodos de mejora parten de una solución al problema de distribución a partir de la cuál, realizando modificaciones sistemáticas, obtienen diferentes soluciones. Generalmente las soluciones iniciales son generadas de manera aleatoria, pero en ocasiones son el fruto de la aplicación de alguna heurística o de alguno de los métodos de construcción. Tras realizar la modificación de una solución ésta es evaluada; si la nueva solución es mejor que la anterior ésta permanece como mejor solución localizada. Este proceso continúa hasta que no es posible localizar mejores soluciones. Las modificaciones que generan una solución a partir de la anterior suelen ser mecanismos de intercambio de la posición de las actividades.

A este tipo de algoritmos pertenecen, entre otros métodos: CRAFT [ Armour et al., 63], H63 [ Hillier, 63], HC63-66 [ Hillier et al., 66], COL [ Vollmann et al., 68], Biased Sampling [ Nugent et al., 68], FRAT [ Khalil, 73], TSP [ Hitchings et al., 76], COFAD [ Tompkins et al., 76], LOGIC [ Tam, 92a], MULTIPLE [ Bozer et al., 94], FLEX-BAY [ Tate et al., 95] y SABLE [ Meller et al., 96a]. Además, pertenecen a este grupo la mayor parte de las técnicas basadas en búsqueda tabú, recocido simulado y algoritmos genéticos. Las características de estas metaheurísticas permiten a los métodos de mejora escapar de óptimos locales mediante la aceptación de movimientos que no generen necesariamente una mejor solución que la actual. De este tipo de métodos, CRAFT es quizá el más conocido; muchos otros métodos son variaciones realizadas sobre la base de CRAFT.

### **Craft**

CRAFT (Computerized Relative Allocation Facilities Techniques) parte de una solución inicial al problema que puede generarse por cualquier método. A partir de esa solución, y mediante intercambio de actividades, se trata de localizar una configuración de la distribución que, respetando las restricciones del problema, sea óptima bajo los criterios empleados para la evaluación.

Los intercambios de actividades son posibles si las actividades interesadas poseen igual área o una frontera común. Evaluando los posibles intercambios es posible escoger aquel que permite un mayor descenso del coste respecto a la configuración espacial actual. El proceso se repite siguiendo una estrategia *steepest descent* que persigue un máximo descenso del coste.

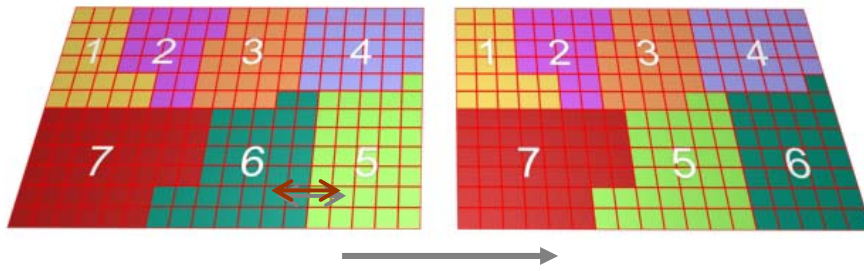


Figura 2.45: Intercambio de dos actividades en CRAFT.

### 2.7.2.2.3 Métodos híbridos

El término algoritmo híbrido se aplica generalmente a aquéllos que poseen las características de los métodos exactos y de los sub-óptimos [Bazaraa et al., 83], o también a la combinación de diferentes heurísticas en un solo algoritmo [Fleurent et al., 94; Kado et al., 95; Glover et al., 95; Koakutsu et al., 95; Mavridou et al., 97; Preux et al., 99; Lee et al., 02; Balakrishnan et al., 03b; Misevicius, 03c; Rodriguez et al., 04]. Sin embargo, en el contexto de este apartado, se entiende por algoritmo híbrido aquél que incluye tanto técnicas constructivas como de mejora [Scriabin et al., 85; Kusiack et al., 87].

### 2.7.2.3 Metaheurísticas

Las técnicas metaheurísticas aplicadas al problema de distribución en planta serán abordadas en profundidad en el capítulo siguiente. Este tipo de métodos es en la actualidad el más empleado debido a los buenos resultados que proporcionan.

En el análisis bibliográfico realizado en [Loiola et al., 04] sobre las publicaciones dedicadas al problema cuadrático de asignación esto queda patente, pues se observa que el número de aportaciones que emplean técnicas metaheurísticas duplica a los que emplean métodos heurísticos o exactos (Figura 2.46).

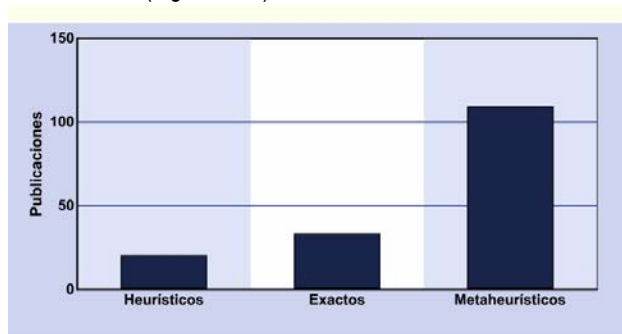


Figura 2.46: Métodos de resolución empleados en la bibliografía.

Adaptado de [Loiola et al., 04].