
CAPITULO 2.

Navegación en Robots Móviles

2.1. Introducción.

Se define navegación como la metodología (o arte) que permite guiar el curso de un robot móvil a través de un entorno con obstáculos. Existen diversos esquemas, pero todos ellos poseen en común el afán por llevar el vehículo a su destino de forma segura. La capacidad de reacción ante situaciones inesperadas debe ser la principal cualidad para desenvolverse, de modo eficaz, en entornos no estructurados.

Las tareas involucradas en la navegación de un robot móvil son: la percepción del entorno a través de sus sensores, de modo que le permita crear una abstracción del mundo; la planificación de una trayectoria libre de obstáculos, para alcanzar el punto destino seleccionado; y el guiado del vehículo a través de la referencia construida. De forma simultánea, el vehículo puede interactuar con ciertos elementos del entorno. Así, se define el concepto de operación como la programación de las herramientas de a bordo que le permiten realizar la tarea especificada. Un ejemplo de esta última noción es el transporte automático de materiales y herramientas dentro de una célula de manufactura flexible (FMS), lo que implica no sólo el movimiento físico de dichos elementos desde la estación de entrada de material hasta la máquina que lo requiera, sino que además pueda realizar operaciones como el cambio automático de la herramienta o la descarga automática del material en la máquina que lo haya solicitado (Newman y Kempf, 1.985).

Este capítulo introduce los conceptos fundamentales que definen la problemática de la realización de trabajos por parte de los robots móviles. Así, en primer lugar se precisan los conceptos de misión, navegación y operación (apartado 2.2.). A continuación se plantean esquemas de navegación utilizados por robots móviles para realizar una tarea, identificando sus principales componentes (apartado 2.3.). En los siguientes apartados se desarrollan dos de estos componentes: el planificador (apartado 2.4.) y el generador (apartado 2.5.), los cuales constituyen el motivo de las aportaciones de esta tesis en los capítulos siguientes. Se procede a una revisión de ambos, dentro de los distintos tipos de

metodologías, para con posterioridad realizar una formalización que los defina de manera precisa. Como ampliación de la labor planificación espacial que ejercen los componentes de planificación y generación, se introduce el concepto de trayectoria (apartado 2.6.). La utilización de dicho concepto posibilita una planificación temporal de la tarea del robot móvil, con lo que se consigue un mayor rendimiento del comportamiento del mismo. Por último, se destacan los aspectos más relevantes de este capítulo en las conclusiones (apartado 2.7.).

2.2. Concepto de misión, navegación y operación.

El robot móvil se caracteriza por realizar una serie de desplazamientos (navegación) y por llevar a cabo una interacción con distintos elementos de su entorno de trabajo (operación), que implican el cumplimiento de una serie de objetivos impuestos según cierta especificación. Así, formalmente el concepto de misión en el ámbito de los robots móviles (Levi, 1.987) se define como la realización conjunta de una serie de objetivos de navegación y operación.

En consecuencia con las definiciones del párrafo anterior, el robot móvil debe poseer una arquitectura que coordine los distintos elementos de a bordo (sistema sensorial, control de movimiento y operación) de forma correcta y eficaz para la realización de una misión. El diseño de esta arquitectura depende mucho de su aplicación en particular, pero un esquema básico de los principales módulos que la componen y la interacción que existe entre los mismos es el presentado en la figura 2.1.

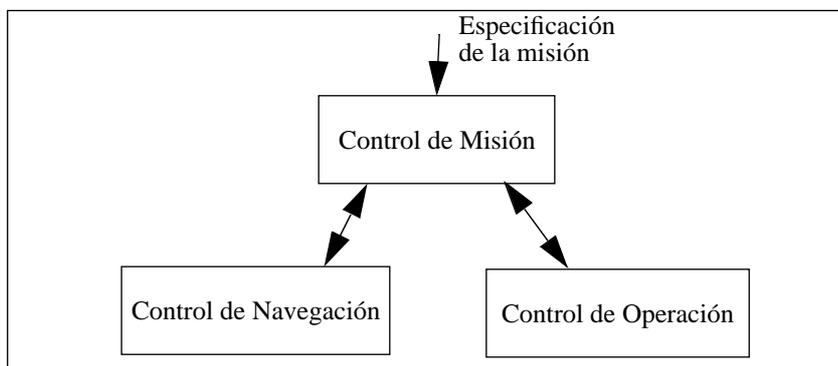


Figura 2.1. Esquema básico de la arquitectura necesaria en un robot móvil para realizar una misión.

En la mencionada figura, se presenta un módulo de *control de misión* (Ollero y otros, 1.994) dedicado a coordinar al controlador de desplazamientos (*control de navegación*) con el controlador del elemento que interacciona con el entorno de trabajo

(*control de operación*). Esta coordinación debe efectuarse de forma perfecta para cumplir los objetivos impuestos por la misión, definida de acuerdo con ciertas especificaciones de entrada. Formalmente, el control de misión debe analizar el problema y encontrar una estrategia para resolverlo, de suerte que el resultado de este análisis será un plan de navegación y otro de operación, los cuales se entregan a los módulos correspondientes de la parte inferior de la figura 2.1.

2.3. Esquemas de navegación en robots móviles.

Realizar una tarea de navegación para un robot móvil significa recorrer un camino que lo conduzca desde una posición inicial hasta otra final, pasando por ciertas posiciones intermedias o submetas. El problema de la navegación se divide en las siguientes cuatro etapas:

- *Percepción del mundo*: Mediante el uso de sensores externos, creación de un mapa o modelo del entorno donde se desarrollará la tarea de navegación (González, 1.993).
- *Planificación de la ruta*: Crea una secuencia ordenada de objetivos o submetas que deben ser alcanzadas por el vehículo. Esta secuencia se calcula utilizando el modelo o mapa de entorno, la descripción de la tarea que debe realizar y algún tipo de procedimiento estratégico.
- *Generación del camino*¹: En primer lugar define una función continua que interpola la secuencia de objetivos construida por el planificador. Posteriormente procede a la discretización de la misma a fin de generar el camino.
- *Seguimiento del camino*: Efectúa el desplazamiento del vehículo, según el camino generado mediante el adecuado control de los actuadores del vehículo (Martínez, 1.994).

Estas tareas pueden llevarse a cabo de forma separada, aunque en el orden especificado. La interrelación existente entre cada una de estas tareas conforma la estructura de control de navegación básica en un robot móvil (Shin y Singh, 1.990) y se muestra en la figura 2.2.

1. En la bibliografía es frecuente encontrar el concepto de planificación de caminos como la unión de las tareas de planificación de la ruta y generación del camino.

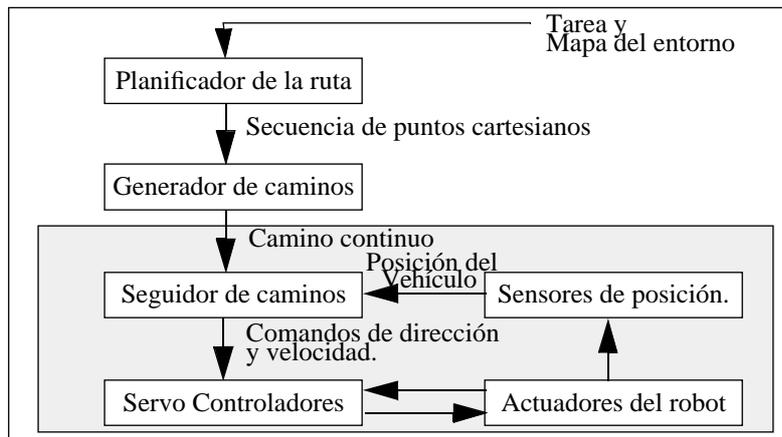


Figura 2.2. Estructura de control de navegación básica para un robot móvil.

En el esquema dispuesto en la figura 2.2 se parte de un mapa de entorno y de las especificaciones de la tarea de navegación. De estos datos se realiza la planificación de un conjunto de objetivos representados como una secuencia de puntos cartesianos dispersos que definen la ruta. Dicho conjunto cumple los requisitos de la tarea impuesta asegurándose de que la ruta asociada está libre de obstáculos. Mediante el uso del generador del camino se construye la referencia que utilizará el seguidor de caminos para generar los comandos de direccionamiento y velocidad que actuarán sobre los servocontroladores del vehículo. Por último, mediante el uso de los sensores internos del vehículo (sensores de posición) en conjunción con técnicas odométricas, se produce una estimación de la posición actual (Cox, 1.991), la cual será realimentada al seguidor de caminos.

La complejidad del sistema necesario para desarrollar esta tarea depende principalmente del conocimiento que se posee del entorno de trabajo. Así, la figura 2.2 considera que se cuenta con un mapa del entorno que responde de forma fiel a la realidad. Mediante el uso adecuado del mismo se puede construir un camino que cumpla los requisitos impuestos por la tarea de navegación, sin que el vehículo colisione con algún elemento del entorno.

Sin embargo, es posible que el modelo del entorno del que dispone el robot adolezca de ciertas imperfecciones al omitir algunos detalles del mismo. El esquema presentado en 2.2 resulta ineficaz, al no asegurar la construcción de un camino libre de obstáculos. Por ello se necesita introducir en la estructura de control básica nuevos elementos que palien este defecto. Un esquema de navegador utilizado en aplicaciones, donde la información acerca del entorno de trabajo varía desde un perfecto conocimiento del mismo hasta poseer un cierto grado de incertidumbre, es el mostrado en la figura 2.3. Dicho sistema corresponde al implantado en el robot móvil Blanche de los laboratorios

AT&T (Nelson y Cox, 1.990).

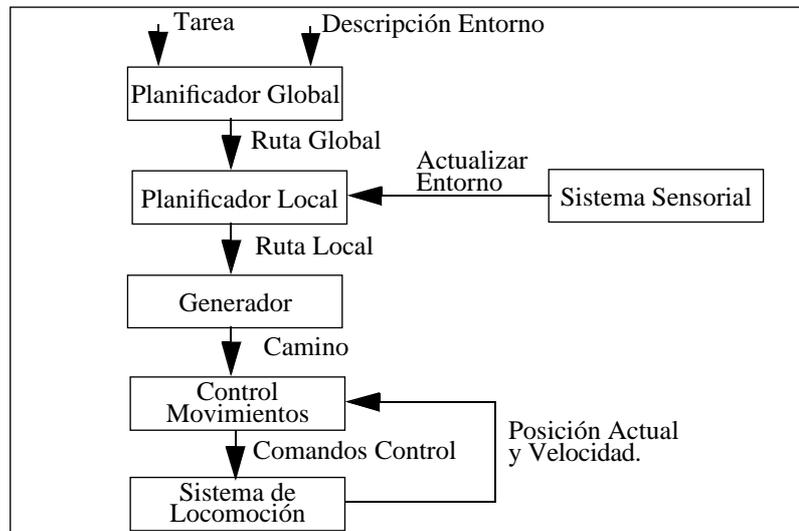


Figura 2.3. Navegador implantado en el robot móvil Blanche de AT&T.

El esquema presentado contiene en líneas generales, el funcionamiento de la estructura de navegación básica. Lo novedoso reside en el desdoblamiento de la tarea de planificación en dos subtareas: planificación global y local. La primera de estas subtareas es análoga al módulo de planificación de la figura 2.2 y construye una ruta sobre la cual se puede definir un camino libre de obstáculos según la información que a priori se posee del entorno. Si la descripción del entorno introducida fuese perfecta, la ruta calculada sería de forma directa la entrada de la tarea *generador*. Sin embargo, al no serlo, puede dar lugar a la construcción de un camino que no esté libre de obstáculos, con el consiguiente peligro de que el vehículo impacte con algún elemento del entorno. La tarea de *planificación local* recibe información del *sistema sensorial* sobre el entorno local del robot, según el radio de alcance de los sensores externos de a bordo. Mediante el análisis de estos datos actualiza el modelo preliminar del entorno y decide si se precisa replanificar la ruta local del robot.

La clave del esquema presentado en la figura 2.3 para adaptarse a diversos entornos, aunque no se posea un conocimiento exhaustivo del mismo, reside en la distinción efectuada entre planificación global y local. Ambos conceptos se pueden definir con mayor precisión de forma que sigue (Levi, 1.987):

- **Planificación global:** Construir o planificar la ruta que lleve al robot a cada una de las submetas determinadas por el control de misión, según las especificaciones del problema que debe resolverse. Esta planificación es una aproximación al camino final que se va a seguir, ya que en la realización de esta acción no se consideran los detalles del entorno local al vehículo.

- **Planificación local:** Resolver las obstrucciones sobre la ruta global en el entorno local al robot para determinar la ruta real que será seguida. El modelo del entorno local se construye mediante la fusión de la información proporcionada por los sensores externos del robot móvil.

La construcción de la ruta global puede realizarse antes de que el vehículo comience a ejecutar la tarea, mientras que la planificación local se lleva a cabo en tiempo de ejecución. En el caso de realizar una navegación sobre entornos totalmente conocidos es obvio que resulta innecesario proceder a una planificación local, pero a medida que disminuye el conocimiento de la zona por la cual el robot móvil realiza su tarea, aumenta la relevancia de la misma.

En aplicaciones de navegación en exteriores o campo a través (Daily, 1.988; Brunitt y otros, 1.992) el conocimiento que se posee del entorno es pobre y por tanto se necesita hacer un uso intensivo de la planificación local. En el robot móvil Navlab II de CMU (Goto y Stentz, 1.987) la navegación está confiada totalmente al planificador local, de suerte que el camino que debe seguir se construye de forma dinámica a medida que se navega. El esquema empleado recurre a un uso más intenso del sistema sensorial que en el caso del Blanche, y se responsabiliza de la coordinación de la percepción, planificación y control del vehículo para guiarlo por el camino especificado, mientras verifica el entorno, y realizar el sorteo de obstáculos. La interacción de cada uno de los módulos en este esquema de navegación local queda representado en la figura 2.4.

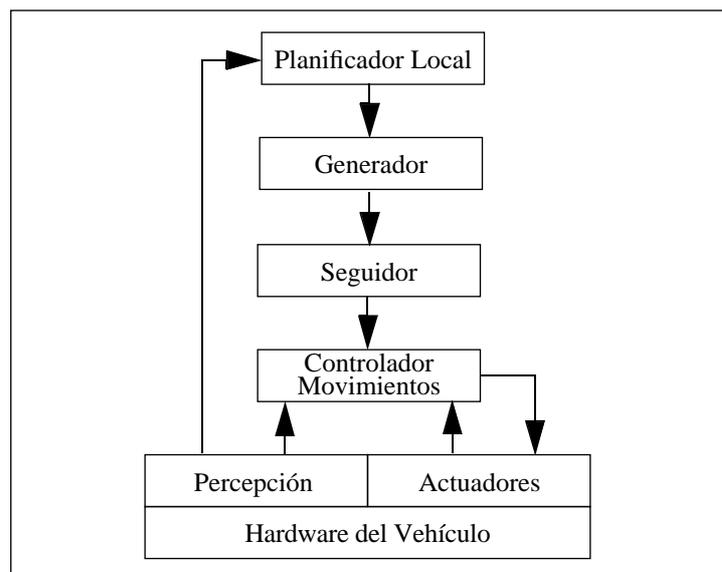


Figura 2.4. Navegador local implantado en el Navlab II de CMU.

El funcionamiento de este navegador local está basado en la realización de un ciclo de construcción del mapa local del entorno inmediato al robot móvil, la elección de una ruta segura por la cual puede pasar el vehículo, de acuerdo con la información suministrada, para, a continuación construir el camino, y por último, realizar el seguimiento. La iteración de este ciclo ocurre cada vez que el *control de movimientos* termina de seguir el camino actual, pasándose en ese momento a la construcción del próximo mapa local de entorno.

La diferencia entre los esquemas de navegador presentados radica en la adaptación que debe poseer el robot móvil para moverse por su entorno de trabajo según el conocimiento de que disponga sobre la estructura del mismo, dándose mayor ponderación a la planificación global o local. Sin embargo, mantienen un nexo común en la realización de forma secuencial y continua las operaciones de percepción, planificación-generación y seguimiento. Este grupo de acciones permite el desarrollo de la navegación minimizando cierto índice de coste, como puede ser la distancia recorrida o el consumo energético del vehículo. Se habla en este caso de una descomposición jerárquica en módulos funcionales que encadenados en forma de ciclo realizan la denominada navegación estratégica (Brooks, 1.986). Además, este tipo de navegación se caracteriza por la necesidad de conocer con el mínimo error posible la posición actual del vehículo, ya que la realimentación de esta información es la base para el cálculo de la próxima acción de control. Mediante el uso de la odometría del vehículo se puede realizar esta acción, pero debido a la naturaleza del método y a las características de los sensores utilizados, la estimación efectuada se ve afectada por errores acumulativos (Watanabe y Yuta, 1.990). Cuando dichos errores alcanzan niveles indeseables se hace necesario eliminarlos mediante la utilización de algoritmos de estimación de la posición basados en referencias externas (González J., 1.993). La navegación estratégica tiene sus limitaciones en entornos dinámicos no conocidos, ya que requiere un completo conocimiento de la dinámica de los posibles obstáculos móviles, además de una adecuada actualización del mapa de entorno.

La filosofía alternativa a la navegación estratégica consiste en el uso intensivo de sensores de bajo coste (transductores ultrasónicos, sensores infrarojos, sensores táctiles, etc.) con el fin de reaccionar dinámicamente ante el entorno, con lo cual pierde relevancia el concepto de planificación y seguimiento de caminos. Esta tendencia se ha basado en la *subsumption architecture* (Brooks, 1986), una arquitectura descompuesta en módulos especializados en realizar tareas individuales, denominados comportamientos. Se trata de una descomposición vertical del problema de navegación que se comporta de forma eficiente en entornos dinámicos donde se posee un conocimiento impreciso del mismo. Este esquema aparece mostrado en la figura 2.5.

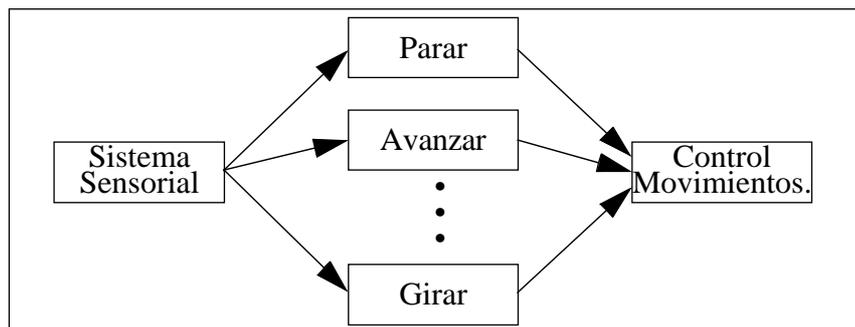


Figura 2.5. Navegación reactiva.

En cada intervalo de navegación el sistema sensorial, según la información extraída del entorno local del robot, activa uno o varios comportamientos simples que suman sus actuaciones, de suerte que el comportamiento final resulta una mezcla de los simples activados.

La navegación reactiva basada en comportamientos ha sido implantada en múltiples aplicaciones (Arkin, 1987; Anderson y Donath, 1988) entre las que predominan los comportamientos de supervivencia, dando lugar a robots errantes que se mueven con libertad por entornos desconocidos e incluso dinámicos, sin colisionar con los obstáculos, pero que raramente obedecen a un plan establecido, imprescindible en misiones reales.

2.4. Planificación de la ruta.

Una primera definición del problema de la planificación, ya sea global o local, consiste en encontrar una ruta segura capaz de llevar al vehículo desde la posición actual hasta la especificada de destino. El concepto de ruta segura implica el cálculo de un camino al menos continuo en posición, que sea libre de obstáculos. En virtud de esta ruta, el generador construirá las referencias que se le entregan al control de movimientos. Por ello, en la especificación de esta ruta se obvian las características cinemáticas y dinámicas del vehículo, ya que el cómputo de una referencia adecuada que cumpla con estos atributos es tarea del generador de caminos. Por tanto, la ruta al tan sólo asegurar continuidad en posición, supone que únicamente los robots móviles omnidireccionales puedan seguir una referencia de tales características.

En los siguientes subapartados se propone en primer lugar, una formalización del concepto de ruta, para, a continuación, describir métodos que, en atención a diferentes enfoques, realizan la acción de planificación.

2.4.1. Formalización del problema de la planificación.

El entorno de trabajo en el cual un robot móvil realizará su tarea, puede considerarse como un conjunto de configuraciones (Lozano-Pérez, 1.983) en las cuales puede encontrarse el robot en un determinado instante de tiempo. Entre ellas existirá un subconjunto inalcanzable, al estar ocupado por los obstáculos del entorno.

Se define una configuración q de un robot como un vector cuyas componentes proporcionan información completa sobre el estado actual del mismo. Un robot es un objeto rígido al cual se le puede asociar un sistema de coordenadas móvil. La localización del vehículo en un determinado instante de tiempo queda definido por la relación existente entre el sistema de coordenadas global F_g en virtud del cual está definido todo el entorno de trabajo y su sistema de coordenadas locales asociado F_r (Figura 2.6.).

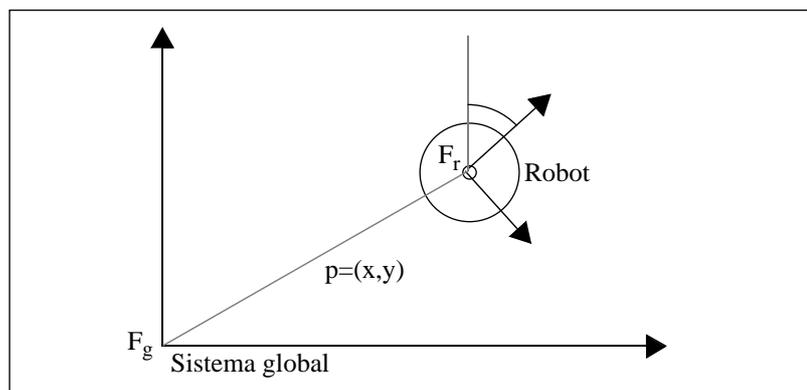


Figura 2.6. Sistema de coordenadas global, y sistema local asociado al robot.

El vector que proporciona información sobre el estado actual del robot viene dado, en principio, por dos componentes: la posición p y la orientación θ . Por tanto, se puede definir configuración como:

$$q = (p, \theta) = (x, y, \theta) \quad (2.1)$$

Se denomina espacio de configuraciones C del robot R a todas las configuraciones q que puede tomar el robot en su entorno de trabajo. El subconjunto de C ocupado por el robot R cuando este se encuentra en q , se denota por $R(q)$. Si el robot se modela de forma circular con radio r , $R(q)$ se define como:

$$R(q) = \{ q_i \in C \mid \|q, q_i\| \leq r \} \quad (2.2)$$

En el caso de un robot puntual, en la expresión (2.2), es nulo, con lo cual se cumple:

$$R(q) = \{q\} \quad (2.3)$$

En el espacio de trabajo, donde el robot realizará su tarea, se encuentran distribuidos una serie de obstáculos definidos como un conjunto de objetos rígidos B y que se encuentran distribuidos por el espacio de configuraciones C .

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\} \quad (2.4)$$

El conjunto de configuraciones del espacio C ocupadas por un obstáculo se define por $b_i(q)$, de tal forma que el subconjunto de configuraciones de C , que especifican el espacio libre de obstáculos viene dado por:

$$C_l = \{q \in C / R(q) \cap \bigcup_{i=1}^q b_i(q) = \emptyset\} \quad (2.5)$$

Según esta metodología, el problema de la planificación, tal y como se ha definido, queda transformado en la búsqueda de una sucesión de posturas q tal que la primera de ellas sea la postura actual del robot q_a y la última de esta sucesión la postura objetivo q_f . Todas las posturas de la serie deben pertenecer al subconjunto C_l definido en la expresión (2.5). Es decir, una ruta Q_r que conecta la postura inicial q_a con la final q_f es:

$$Q_r = \{q_a, \dots, q_f / q_i \in C_l\} \quad (2.6)$$

La especificación de este conjunto Q_r implica la construcción de una función ruta definida de la siguiente forma:

$$r: [0, 1] \rightarrow C_l \quad (2.7)$$

tal que:

$$r(0) = q_a \quad r(1) = q_f \quad (2.8)$$

Además de la restricción mostrada en (2.7), se le exige a la función r , teniendo en cuenta la suposición de robot un omnidireccional, la continuidad. Este concepto se refleja en la siguiente expresión:

$$\lim_{s \rightarrow s_0} \|r(s) - r(s_0)\| = 0 \quad (2.9)$$

2.4.2. Métodos clásicos de planificación.

Todos ellos se fundamentan en una primera fase de construcción de algún tipo de grafo sobre el espacio libre, según la información poseída del entorno, para posteriormente emplear un algoritmo de búsqueda en grafos (por ejemplo tipo A^{*}) que encuentra el camino óptimo según cierta función de coste.

2.4.2.1. Planificación basada en grafos de visibilidad.

Los grafos de visibilidad (Nilsson, 1.969) proporcionan un enfoque geométrico útil para resolver el problema de la planificación. Supone un entorno bidimensional en el cual los obstáculos están modelados mediante polígonos. Para la generación del grafo este método introduce el concepto de *visibilidad*, según el cual define dos puntos del entorno como *visibles* si y solo si se pueden unir mediante un segmento rectilíneo que no intersecte ningún obstáculo (si dicho segmento resulta tangencial a algún obstáculo se consideran los puntos afectados como visibles). En otras palabras, el segmento definido debe yacer en el espacio libre del entorno C_f .

Así, si se considera como nodos del grafo de visibilidad la posición inicial, la final y todos los vértices de los obstáculos del entorno, el grafo resulta de la unión mediante arcos de todos aquellos nodos que sean visibles.

En la figura 2.7 se muestra el grafo de visibilidad construido merced a los obstáculos poligonales existentes en el entorno y las configuraciones inicial q_a y final q_f .

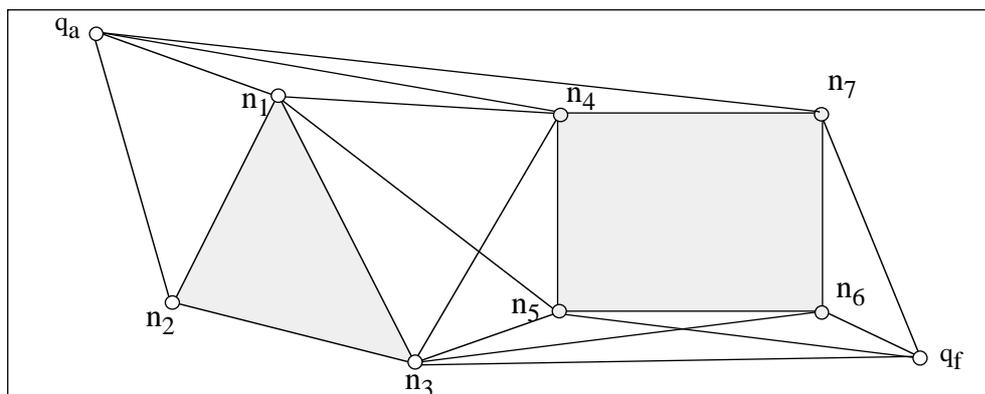


Figura 2.7. Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos.

En el grafo mostrado (Figura 2.7.), se puede observar cómo sólo están unidos los nodos directamente visibles, de tal forma que el conjunto de arcos estará formado por las

aristas de los obstáculos, más el resto de líneas que relacionan los vértices de los diferentes polígonos.

Mediante un algoritmo de búsqueda en grafos se elige la ruta que una la configuración inicial con la final minimizando alguna función de coste. La ruta que cumple el objetivo de la navegación queda definida como una sucesión de segmentos que siguen los requisitos especificados.

Aunque en principio el método está desarrollado para entornos totalmente conocidos, existe una versión denominada LNAV (Rao y otros, 1.988) capaz de efectuar una planificación local a medida que se realiza la labor de navegación. Este algoritmo, que parte de una determinada posición, determina los nodos visibles desde el punto actual. Elige el más cercano de los nodos visibles, según distancia euclídea a la posición final, para desplazarse posteriormente al nodo seleccionado y marcarlo como visitado. Desde esta nueva posición se vuelve a iterar el proceso hasta llegar a la posición final (éxito), o bien no existen más nodos sin visitar (fracaso).

Dentro de los métodos basados en grafos de visibilidad, se encuentran algoritmos especializados en la búsqueda de la ruta óptima que lleve al vehículo desde la posición inicial *A* hasta la final *B* a través de un entorno en el cual el espacio libre entre obstáculos está modelado mediante el uso de dos cadenas de segmentos (Lodares y Abellana, 1.989; Muñoz y otros, 1.993).

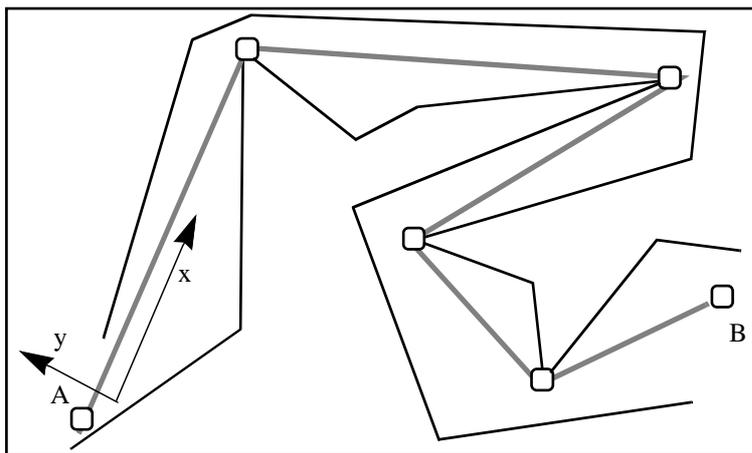


Figura 2.8. Planificación con el espacio libre de obstáculos modelado mediante cadenas.

Aunque están restringidos a esquemas de entornos muy concretos, el uso queda justificado debido a su bajo coste computacional. Como se puede observar en la figura 2.8, los algoritmos desarrollados para encontrar la ruta óptima bajo las condiciones descritas, se

basan en enlazar los nodos situados en las zonas convexas del entorno tal que dos nodos consecutivos son visibles.

El uso de métodos de planificación basados en grafos de visibilidad está muy extendido, debido a que se pueden construir algoritmos a bajo coste computacional que resuelvan el referido problema. Sin embargo, utilizar como nodos los vértices de los obstáculos implica que no son inmediatamente aplicables en la práctica, ya que un robot móvil real no consiste en un punto. Por ello, algunos autores (Latombe, 1.991) denominan a la ruta planificada semi-libre de obstáculos.

2.4.2.2. Planificación basada en diagramas de Voronoi.

Al contrario que los métodos basados en grafos de visibilidad, la planificación basada en diagramas de Voronoi sitúa la ruta lo más alejada posible de los obstáculos. Con ello elimina el problema presentado por los grafos de visibilidad de construir rutas semi-libres de obstáculos.

Los diagramas de Voronoi se definen como una proyección del espacio libre del entorno en una red de curvas unidimensionales yacientes en dicho espacio libre. Formalmente se definen como una retracción (Janich, 1.984) con preservación de la continuidad. Si el conjunto C_l define las posiciones libres de obstáculos de un entorno, la función retracción RT construye un subconjunto C_v continuo de C_l .

$$RT(q):C_l \rightarrow C_v/C_v \subset C_l \quad (2.10)$$

De esta forma, se dice que existe un camino desde una configuración inicial q_a hasta otra final q_f , supuestas ambas libres de obstáculos, si y solo si existe una curva continua desde $RT(q_a)$ hasta $RT(q_f)$.

La definición de la función retracción RT implica la construcción del diagrama de Voronoi (Rombaut y otros, 1.991). La idea fundamental, como se ha expuesto en el primer párrafo de este subapartado, es ampliar al máximo la distancia entre el camino del robot y los obstáculos. Por ello, el diagrama de Voronoi resulta el lugar geométrico de las configuraciones que se encuentran a igual distancia de los dos obstáculos más próximos del entorno. El diagrama estará formado por dos tipos de segmentos: rectilíneos y parabólicos. La elección de la modalidad de segmento corresponde con la clase de elementos de los obstáculos más cercanos que se encuentren enfrentados entre sí. De esta forma, el lugar

geométrico de las configuraciones que se hallan a igual distancia de dos aristas de dos obstáculos diferentes es una línea recta, mientras que en el caso de tratarse de un vértice y una arista resulta una parábola.

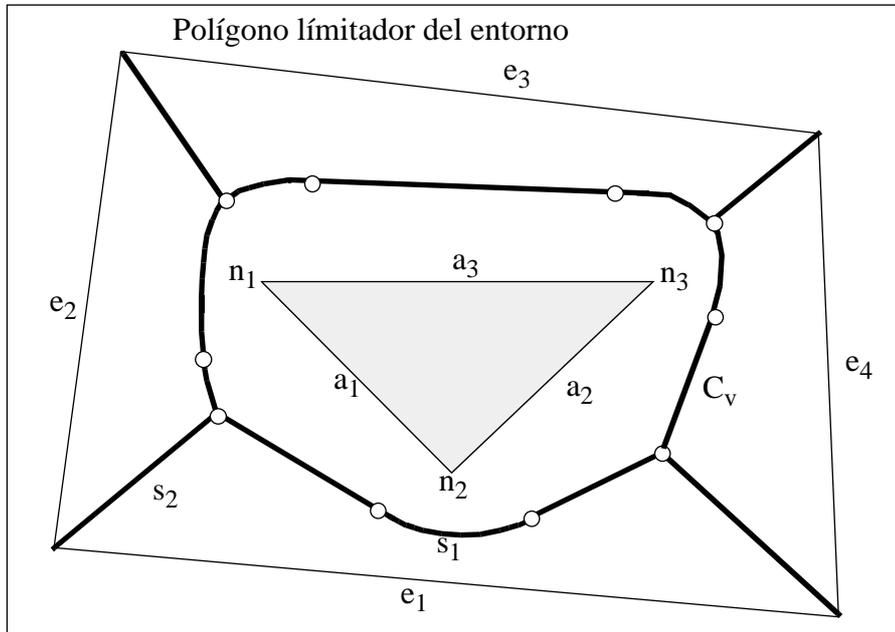


Figura 2.9. Retracción del espacio libre en un diagrama de Voronoi.

En la figura 2.9 se muestra un entorno delimitado por un polígono de aristas $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ y un obstáculo triangular de vértices $\{n_1, n_2, n_3\}$ y aristas $\{a_1, a_2, a_3\}$. La retracción del espacio libre en una red continua de curvas es el diagrama de Voronoi C_v , representado mediante las líneas de trazo grueso. Los dos tipos de segmento utilizados en la construcción del diagrama pueden distinguirse en la mencionada figura, así, el segmento s_1 es el lugar geométrico de los puntos equidistantes entre la arista e_1 , y el vértice n_2 . Por otra parte, puede observarse como el segmento rectilíneo s_2 cumple la misma condición pero con respecto a las aristas e_1 y e_2 .

Dado una configuración q no perteneciente a C_v , existe un único punto p más cercano perteneciente a un vértice o arista de un obstáculo. La función $RT(q)$ se define como el primer corte con C_v de la línea que une p con q (Figura 2.10.).

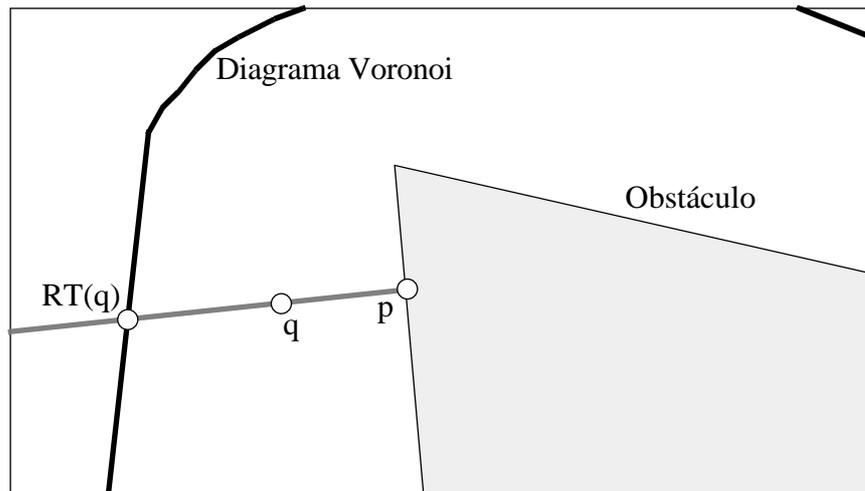


Figura 2.10. Imagen de una configuración q en el diagrama de Voronoi.

El algoritmo de planificación, en esencia, consiste en encontrar la secuencia de segmentos s_i del diagrama de Voronoi tal que conecten $RT(q_a)$ con $RT(q_f)$. Dicha secuencia conforma la ruta buscada. A continuación se describe el algoritmo:

- i) Calcular el diagrama de Voronoi.
- ii) Calcular $RT(q_a)$ y $RT(q_f)$.
- iii) Encontrar la secuencia de segmentos $\{s_1, \dots, s_p\}$ tal que $RT(q_a)$ pertenece a s_1 y $RT(q_f)$ pertenece a s_p .
- iv) Si se encuentra dicha secuencia, devolver la ruta. Si no indicar condición de error.

Al igual que los grafos de visibilidad, este método también trabaja en entornos totalmente conocidos y con obstáculos modelados mediante polígonos. Sin embargo, también existen versiones para la utilización del mismo con obstáculos inesperados (Meng, 1.988).

2.4.2.3. Planificación basada en modelado del espacio libre.

Se aplica a arquetipos de entornos con obstáculos poligonales, y la planificación en este caso se realiza mediante el modelado del espacio libre (Brooks, 1.983). Esta acción se lleva a cabo por los denominados cilindros rectilíneos generalizados (CRG). Al igual que los diagramas de Voronoi, con el uso de los CRG se pretende que el vehículo navegue lo más

alejado de los obstáculos. De forma que la ruta que lleve al robot desde una configuración inicial hasta otra final estará compuesta por una serie de *CRG* interconectados, de tal modo que la configuración de partida se encuentre en el primer cilindro de la sucesión y la final en el último.

La construcción de un *CRG* se realiza a partir de las aristas de los distintos obstáculos que se encuentran en el entorno. Para que un par de aristas 1a_i y 2a_j pertenecientes a los obstáculos b_1 y b_2 respectivamente puedan formar un cilindro generalizado, deben cumplir las siguientes condiciones:

- i) La arista 1a_i está contenida en una recta que divide al plano en dos regiones. La arista 2a_j debe yacer por completo en la región opuesta en la que se encuentra situada b_1 . Este criterio es simétrico.
- ii) El producto escalar de los vectores normales con dirección hacia el exterior del obstáculo que contiene cada arista debe resultar negativo.

Si se cumplen estas condiciones significa que ambas aristas se encuentran enfrentadas, y por tanto se puede construir un *CRG* con ellas (Figura 2.11.).

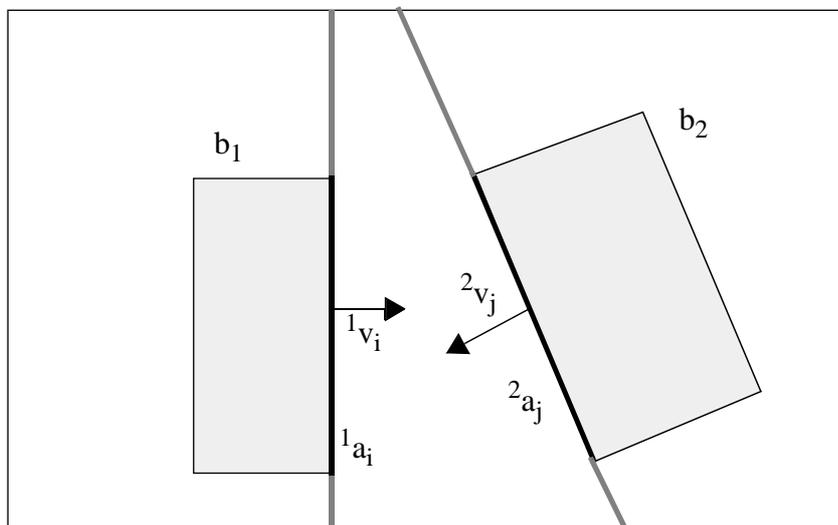


Figura 2.11. Condiciones que deben cumplir dos aristas para construir un *CRG*.

Una vez detectadas dos aristas que pueden formar un *CRG*, el siguiente paso será construirlo. El proceso para alcanzar este cometido, se encuentra descrito en la figura 2.12.

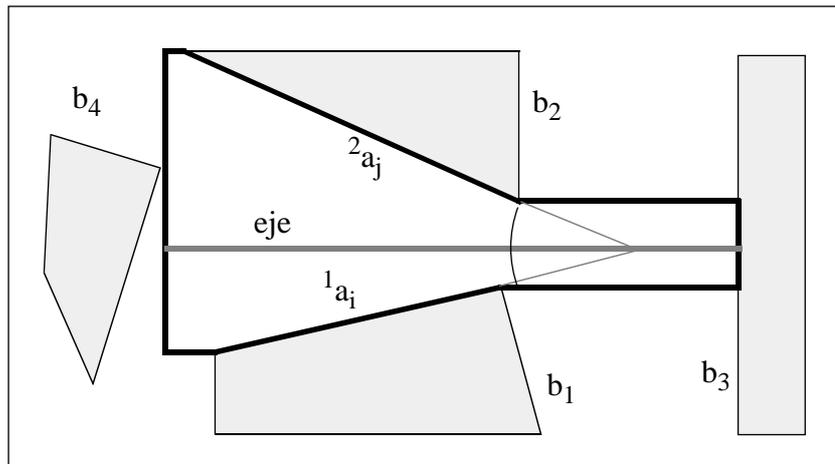


Figura 2.12. Construcción de un CRG.

El primer paso es el cálculo del *eje* del CRG, el cual se define como la bisectriz del ángulo formado por el corte de las rectas que contienen las aristas 1a_i y 2a_j que cumplen las condiciones i) y ii) expuestas más arriba. Por ambos lados de dichas aristas se construyen segmentos rectilíneos paralelos al *eje*, con origen en los vértices de las aristas implicadas y con extremo señalado por la proyección del primer obstáculo que corta el *eje*.

Repitiendo este proceso, se construye una red CRG en el entorno del robot que modela el espacio libre del mismo. El robot navegará por el eje del cilindro, en el cual se encuentran anotadas para cada punto el rango de orientaciones admisibles. El paso de un CRG a otro se produce siempre y cuando sus ejes intersecten y la intersección del rango de orientaciones admisibles en el punto de corte de ambos *ejes* no sea nulo.

2.4.2.4. Planificación basada en la descomposición en celdas.

Este tipo de métodos se fundamenta en una descomposición en celdas del espacio libre (Thorpe, 1,984). Así, la búsqueda de una ruta desde una postura inicial q_a hasta otra final q_f , consiste en encontrar una sucesión de celdas que no presente discontinuidades, tal que la primera de ellas contenga a q_a y la última a q_f . Al contrario que los métodos expuestos a lo largo de este apartado, no encuentra una serie de segmentos que modele la ruta, sino una sucesión de celdas; por ello, se hace necesario un segundo paso de construcción de un *grafo de conectividad*, encargado de definir la ruta.

Para la planificación según el método de descomposición en celdas, se precisa la resolución de dos problemas: la descomposición del espacio libre en celdas y la construcción de un grafo de conectividad. El primero de ellos implica construir unas celdas

con determinada forma geométrica tal que resulte fácil de calcular un camino entre dos configuraciones distintas pertenecientes a la celda, y la comprobación para averiguar si dos celdas son adyacentes debe disfrutar de la mayor simpleza posible. Aparte de estas características, la descomposición global del espacio libre implica que no deben existir solapamientos entre celdas y que la unión de todas ellas corresponde exactamente al espacio libre.

El grafo de conectividad es un grafo no dirigido, y su construcción está asociada a la descomposición en celdas efectuada en el paso anterior, del tal forma, que los nodos van a ser cada una de las celdas, existiendo un arco entre dos celdas si y solo si son adyacentes (Figura 2.13.).

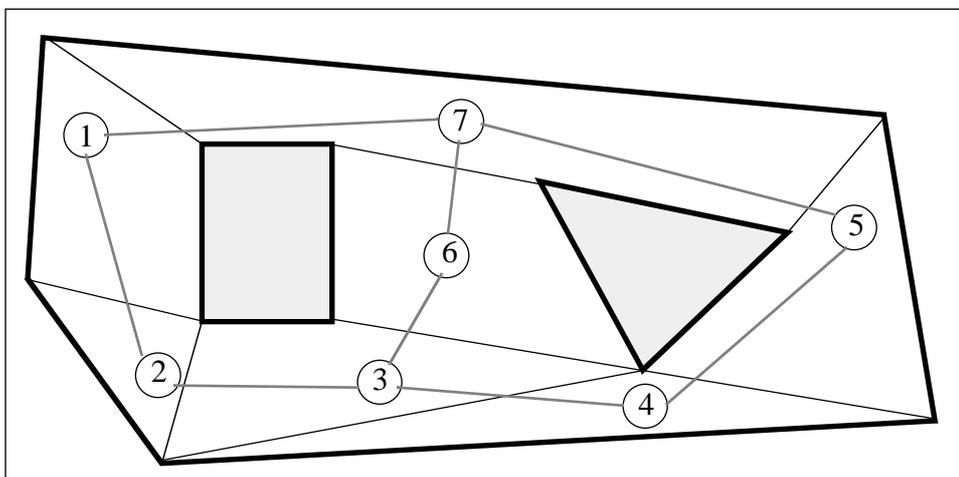


Figura 2.13. Descomposición en celdas y grafo de conectividad.

Una vez especificado el grafo de conectividad, sólo queda emplear un algoritmo de búsqueda en grafos, para la detección de la celda que contiene la postura a la cual se desea llegar, tomando como partida la que contiene la postura inicial.

Los distintos métodos basados en este principio, se distinguen por la forma en la cual realizan la descomposición en celdas y como se construye el grafo de conectividad. El método más sencillo de descomposición del espacio libre del entorno en celdas resulta el denominado *descomposición trapezoidal* (Latombe, 1991). Este método se basa en la construcción de segmentos rectilíneos paralelos al eje Y del sistema global F_g a partir de los vértices de cada uno de los elementos del entorno. El final del segmento queda delimitado por el primer corte de la línea con un elemento del entorno. Esta descomposición es la mostrada en la figura 2.14.

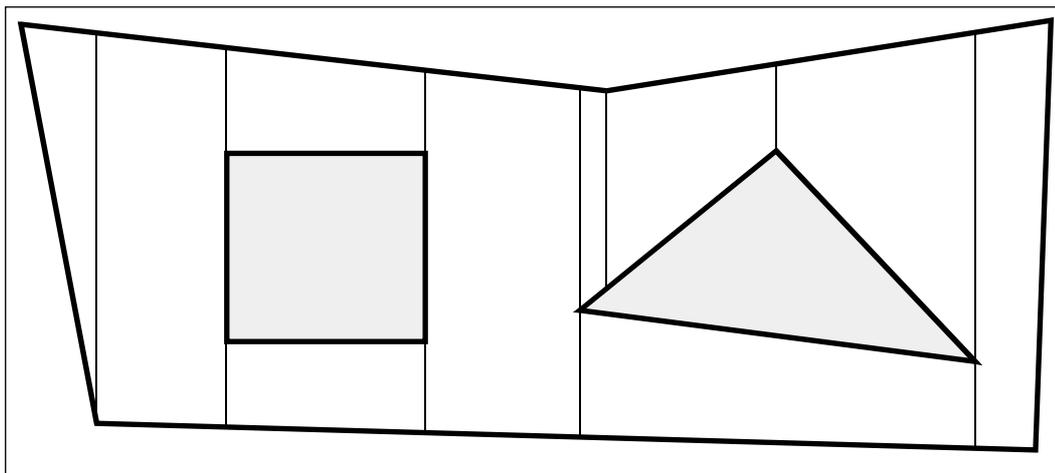


Figura 2.14. Descomposición trapezoidal del espacio libre.

El grafo de conectividad se construye por medio de la unión de los puntos medios de los segmentos verticales definidos (Figura 2.15.).

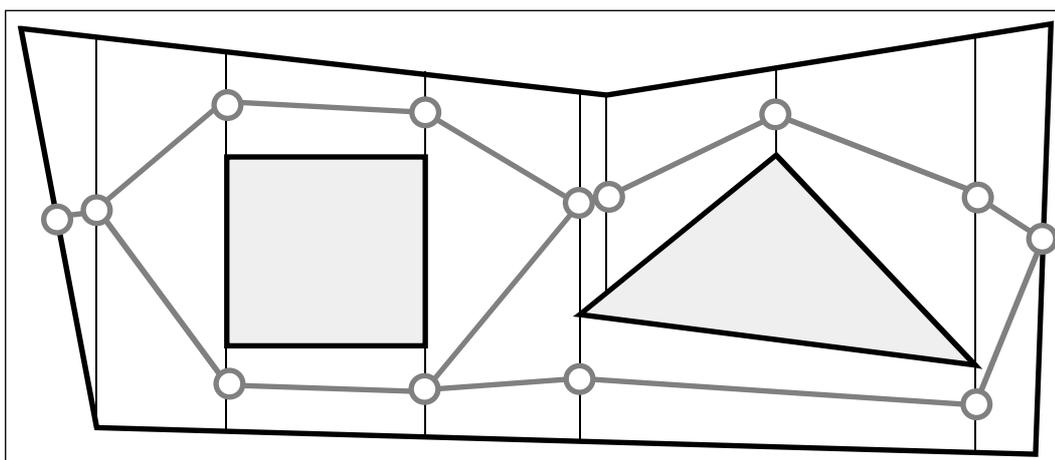


Figura 2.15. Grafo de conectividad de una descomposición trapezoidal.

Este tipo de enfoque se presta a muchas variantes, por ejemplo la utilización de varios niveles de resolución para una búsqueda jerarquizada (Kambhampati y Davis, 1.986), o bien el uso de celdas en tres dimensiones para la planificación de caminos en espacios tridimensionales (Stentz, 1.990).

2.4.2.5. Planificación basada en campos potenciales¹.

Los métodos basados en campos potenciales poseen una concepción totalmente distinta a los expuestos más arriba al estar basados en técnicas reactivas de navegación. El ámbito de uso de esta técnica se centra en la planificación local en entornos desconocidos, como puede ser el sorteo en tiempo real de obstáculos o de los que no se tiene constancia (Borenstein y Koren, 1.989, 1.991)

La teoría de campos potenciales considera al robot como una partícula bajo la influencia de un campo potencial artificial, cuyas variaciones modelan el espacio libre. La función potencial U en un punto p del espacio euclídeo, se define sobre el espacio libre y consiste en la composición de un potencial atractivo $U_a(p)$, que atrae al robot hacia la posición destino, y otro repulsivo $U_r(p)$ que lo hace alejarse de los obstáculos, es decir:

$$U(p) = U_a(p) + U_r(p) \quad (2.11)$$

La fuerza artificial $F(p)$ a la que afecta el vehículo en la posición p , por el potencial artificial $U(p)$ resulta:

$$F(p) = - U(p) \quad (2.12)$$

Al igual que la función potencial, la fuerza artificial es el resultado de la suma de una fuerza de atracción $F_a(p)$, proveniente de la posición destino, y otra fuerza de repulsión $F_r(p)$ debidas a los obstáculos del entorno de trabajo:

$$F(p) = F_a(p) + F_r(p) \quad (2.13)$$

Así, la navegación basada en campos potenciales se basa en llevar a cabo la siguiente secuencia de acciones:

- i) Calcular el potencial $U(p)$ que actúa sobre el vehículo en la posición actual p según la información recabada de los sensores.
- ii) Determinar el vector fuerza artificial $F(p)$ según la expresión (2.12).
- iii) En virtud del vector calculado construir las consignas adecuadas para los actuadores del vehículo que hagan que éste se mueva según el sentido, dirección y aceleración especificadas por $F(p)$.

1. Debido a la naturaleza del método, se utiliza solamente el componente de posición de una configuración. Por ello, en este subapartado la notación no corresponde exactamente a la introducida.

La iteración continua del ciclo expuesto proporciona una navegación reactiva basada en campos potenciales. El comportamiento del vehículo está muy ligado a la definición que se efectúe de los potenciales de atracción y repulsión. El potencial de atracción debe ir en función de la distancia euclídea a la posición destino, de forma, que a medida que el robot móvil se acerca, este disminuya su influencia. Por otra parte, el potencial repulsivo conviene que sólo influya en el movimiento del vehículo cuando éste se encuentre demasiado próximo a un obstáculo, de forma que la fuerza debida a este hecho tenga una dirección tal que lo aleje del mismo. En la posición destino es necesario que la suma de ambos potenciales resulte nula.

En el caso de conocer todo el entorno de trabajo y realizando una simulación del movimiento del robot a través del mismo, resulta posible construir una ruta que lleve al vehículo desde la posición inicial hasta la final. Dada la posición actual p_i , la próxima posición que debe alcanzar en un ciclo de simulación p_{i+1} resulta:

$$p_{i+1} = p_i + \alpha_i \mathbf{J}(U(p)) \quad (2.14)$$

donde α_i es un factor de escalado y $\mathbf{J}(U(p))$ representa al jacobiano de la función potencial en el punto p . El factor de escalado define la longitud del segmento con origen en p_i y final en p_{i+1} , y debe ser tal que dicho segmento esté libre de obstáculos.

El problema en este tipo de métodos deviene en la aparición de mínimos locales, es decir lugares que no son la posición destino en los cuales el potencial resulta nulo. Una situación de este tipo puede hacer que el robot quede atrapado en una posición que no sea la destino, o bien debido a la naturaleza discreta del método girar alrededor de ella. Solucionar este conflicto implica definir ciertas funciones potenciales que eviten la aparición de mínimos locales, lo cual resulta arduo, si bien existen soluciones que lo aseguran en entornos donde los obstáculos están modelados mediante círculos (Rimon y Koditschek, 1.988). Otra solución para evitar caer en un mínimo local se encuentra en el uso de un algoritmo de búsqueda en grafos. Para ello se divide el entorno mediante el uso de una rejilla. Cada celda tiene almacenado un valor que indica su potencial. Un algoritmo de búsqueda utilizable es A*, usándose como función de coste la función potencial. La expansión de la celda elegida se realiza mediante el recurso a las celdas vecinas.

2.5. Generación de caminos.

El camino es el grupo de consignas que se entregarán al seguidor de caminos para la ejecución de la tarea de navegación. Se construye en función de la ruta definida por la tarea de planificación y debe estar libre de obstáculos. Además de esta característica básica, al utilizarse como referencia del seguidor de caminos, debe poseer ciertas cualidades que faciliten la acción de esta última tarea. La importancia de la definición de un camino con buenas propiedades reside en la capacidad del seguidor para realizar una ejecución del camino con el menor error posible. La acción del generador consiste en la conversión de una ruta en un camino, es decir construir una sucesión de configuraciones que lleve al vehículo de la posición inicial a la final, de forma que elimine la restricción de omnidireccionalidad inherente a la definición de ruta.

El camino se define como la discretización de una curva continua que interpola ciertos *puntos elegidos* de la ruta calculada por el planificador. Por tanto, el problema de la definición de un camino con buenas propiedades pasa por la construcción de la función camino adecuada que las posea. Las características buscadas son aquellas que hacen posible el seguimiento del camino especificado según el comportamiento cinemático y dinámico del vehículo.

2.5.1. Propiedades deseables de un camino.

El análisis de las características cinemáticas que debe tener el camino para que sea seguible por un robot móvil no omnidireccional, necesita disponer de un modelo cinemático preciso de éste. Como arquetipo para el mencionado análisis se puede utilizar un modelo simplificado denominado *modelo de la bicicleta*, el cual se emplea con fiabilidad para el estudio de la cinemática en la mayoría de los robots móviles no omnidireccionales con ruedas, y de dos grados de libertad: direccionamiento y propulsión (Shin y Singh, 1.990; Martínez, 1.994).

Se denomina punto de guía del modelo del vehículo al punto que se desea controlar para seguir el camino. La elección de la situación de este punto es una decisión importante ya que afecta a los valores requeridos de direccionamiento y a la propulsión para realizar el seguimiento del camino a una velocidad dada. Por lo general, se elige el punto de guía en el mencionado modelo, situado en el punto medio del eje trasero, según se muestra en la figura 2.16.

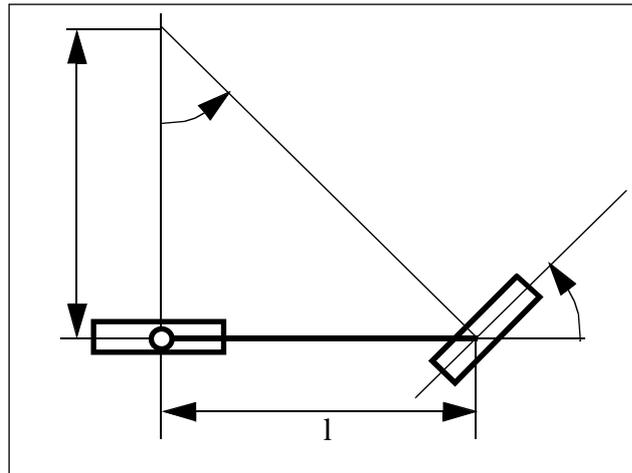


Figura 2.16. Modelo cinemático de la bicicleta.

Las ventajas de optar por la antedicha elección aparecen descritas a continuación:

- El ángulo de direccionamiento en cualquier punto del camino se determina de forma geométrica con independencia de la velocidad, de la siguiente forma:

$$\theta = \text{atan} \frac{l}{R} \quad (2.15)$$

donde l es la distancia entre ejes y R el radio de giro actual.

- La velocidad angular de la rueda trasera motora queda determinada por la velocidad del vehículo v y el radio de la rueda R_w :

$$\omega = \frac{v}{R_w} \quad (2.16)$$

Si el punto de guía se encontrase situado en cualquier otro lugar, las expresiones para el direccionamiento y la velocidad angular serían más complejas que las mostradas en las ecuaciones (2.15) y (2.16).

- El vehículo posee la capacidad para realizar el mínimo radio de giro R_{\min} con el valor máximo del ángulo de dirección θ_{\max} (Nelson, 1.988).
- La orientación del vehículo está alineada con la dirección de la tangente del punto actual del camino.
- El radio de giro actual coincide con el radio del círculo de osculación del punto presente del camino.

Estas dos últimas cuestiones quedan reflejadas en la figura 2.17.

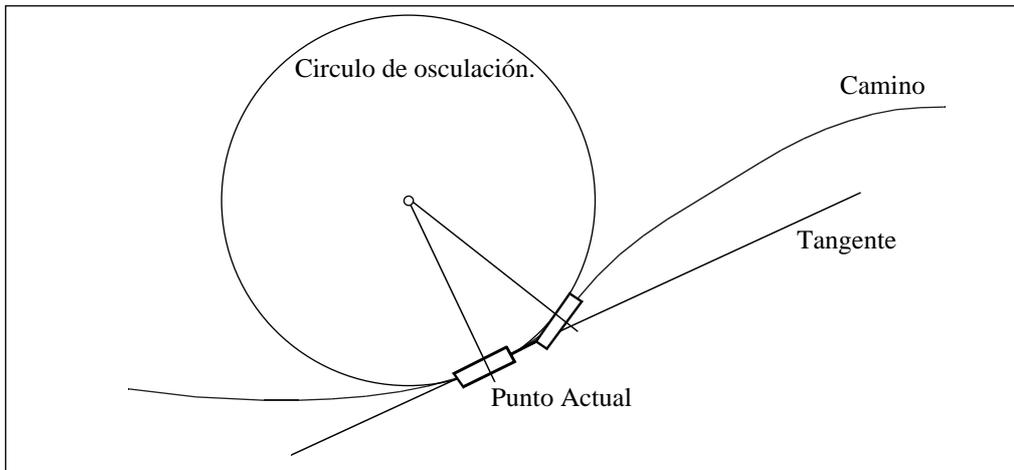


Figura 2.17. Orientación y curvatura del modelo a lo largo de un camino.

Mediante el uso de este modelo se solventa la necesidad de que la función sobre la cual se define el camino ofrezca las siguientes propiedades:

- i) *Poseer continuidad en posición, orientación y curvatura:* Discontinuidades en la orientación del camino conllevan la necesidad de imprimir un cambio brusco en la orientación del vehículo, el cual no lo puede efectuar debido a la restricción de no holonomicidad. Por otra parte, una discontinuidad en la curvatura requeriría una aceleración infinita de la rueda de dirección.
- ii) *Acotación de los valores que puede tomar la curvatura:* Debido a la definición de la curvatura como la inversa del radio del círculo de osculación existe un radio mínimo que puede realizar el vehículo según el ángulo máximo de direccionamiento.
- iii) *Variación lineal de la curvatura:* Una variación suave y lineal de la curvatura minimiza el esfuerzo de control que se debe ejercer sobre los actuadores del vehículo. Como consecuencia se reducen los errores que se producen en el seguimiento del camino.

El cumplimiento de las condiciones expuestas por parte de la función sobre la cual se construye el camino, hace que este último resulte admisible desde el punto de vista cinemático. Además, las características de la curvatura de continuidad y variación lineal proporcionan cambios suaves en la fuerza centrífuga que actúa sobre robot móvil cuando éste se encuentra desplazándose sobre un camino especificado. Por tanto, las condiciones antes reseñadas son también recomendables desde el punto de vista dinámico.

La literatura especifica un amplio grupo de métodos de generación de caminos. La técnica más simple para la generación de caminos se fundamenta en la unión de los puntos elegidos de la ruta mediante la concatenación de segmentos y círculos (Nelson, 1.990). La principal desventaja de los métodos basados en esta premisa, según las conclusiones del párrafo anterior, se constituye en la aparición de discontinuidades del ángulo de direccionamiento en ciertas configuraciones en la rueda directriz. Otros métodos evitan este problema con la construcción de caminos continuos en curvatura utilizando alguna clase de curva de interpolación cúbica como por ejemplo curvas cúbicas tipo Bezier (Segovia y Rombaut, 1.993) pero la mayoría de ellos no asegura una limitación de la curvatura. Las curvas clotoidales (Kanayama y Miyake, 1.985; Shin y Singh, 1.990) o espirales (Kanayama y Hartman, 1.989) sí aseguran una curvatura acotada a lo largo del camino, incluso su variación de forma lineal, pero no poseen una fórmula cerrada para su calculo, lo cual dificulta su ejecución en tiempo real.

2.5.2. Admisibilidad cinemática de un camino.

La ruta se define como una sucesión de segmentos que definen una vía por la cual el robot móvil se desplaza para cumplir su misión. Se presenta como una línea quebrada que se identifica por la sucesión de aristas que la componen, donde sus extremos coinciden con la posición inicial y el objetivo de la planificación. Sea $G=\{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ dicho conjunto de aristas y extremos de la ruta. La extensión inmediata de la función ruta para la eliminación de la restricción de un robot móvil omnidireccional se constituye como la especificación de una función camino $P(\cdot)$ construida a partir de la primera que posea las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} & \forall g_i \in G \quad P(\cdot) \in C^2 \\ & P(0) = g_1 \\ & P(\cdot) = g_p \end{aligned} \quad (2.17)$$

Esta función se expresa de forma paramétrica, de tal forma que un punto p_i de la curva viene definido por la asignación de un valor al parámetro de la función; así $p_i=P(\cdot)= [P_x(\cdot), P_y(\cdot)]$ define una posición dentro de la función camino. Si a dicha posición se le añaden los valores de orientación y curvatura, se obtiene una tetra-upla denominada postura que caracteriza la posición, orientación y curvatura del robot cuando se encuentre en dicho punto del camino. Una postura consiste en la extensión del concepto de configuración necesario para asignar al camino las propiedades que se relacionaron en el

subapartado anterior. De esta forma, la postura i -ésima del camino resulta $q_i=(p_{i^x} \ p_{i^y} \ \theta_i)$ donde los dos últimos componentes se definen como sigue:

$$p_{i^x} = (P'(s_i)) = -\tanh \frac{P'_x(s_i)}{P'_y(s_i)} \quad p_{i^y} = (P(s_i)) = \frac{d^2}{ds} P(s_i) \quad (2.18)$$

La discretización de la función camino $P(s)$ se define como una aplicación biyectiva de \mathbb{R}^4 a la cual a cada valor s_i del parámetro se le asocia una postura q_i . De este modo, se construye una secuencia Q de posturas q_i , que se denomina camino.

Sea $L=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ los valores posibles del parámetro en el intervalo $[0, L]$, tal que $s_1=0$ y $s_n=L$, por lo que la definición del conjunto ordenado Q como camino es:

$$Q = \{[P(s_i), (P'(s_i)), (P''(s_i))] \mid s_i \in L\} \quad (2.19)$$

Según la definición dada de camino, no se consideran la presencia de posibles obstáculos en el entorno o las restricciones que deben imponerse en el camino para que el robot pueda realizarlo. Estas se presentan como característica fundamentales que definen un buen camino.

Como continuación a la formulación basada en el espacio de configuraciones, sea $B=\{b_1, b_2, \dots, b_q\}$ el conjunto de obstáculos y $R(q_i)$ la región del espacio que ocupa el robot en la configuración q_i . La condición precisa para que el vehículo en su recorrido del camino especificado por Q no colisione con ningún obstáculo de su entorno es:

$$(q_i \in Q) \cap (b_j \in B; R(q_i)) = \emptyset \quad (2.20)$$

En segundo lugar, la capacidad de un robot móvil de la realización de un camino, desde el punto de vista cinemático, depende exclusivamente de la restricción de no-holonomicidad de la curvatura. Si se considera (dx, dy) el cambio de posición efectuado por el robot en un tiempo dt , esta restricción se enuncia como sigue:

$$-\sin \theta dx + \cos \theta dy = 0 \quad (2.21)$$

De este modo, si la función camino $P(\cdot)$ no viola esta restricción, el camino Q podrá ser seguido. El efecto de la ecuación (2.21) se configura como la limitación del radio de giro mínimo que puede desarrollar el robot. Por tanto, si el radio de giro del robot es r_{min} , entonces la función $P(\cdot)$ debe verificar lo siguiente:

$$P(x_i, y_i) \in [-\frac{1}{r_{min}}, \frac{1}{r_{min}}] \quad (2.22)$$

y como consecuencia, el camino Q

$$\| \dot{q}_i \| = \sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2} \leq \frac{1}{r_{min}} \quad (2.23)$$

en la que esta última expresión se denomina como la condición de admisibilidad cinemática del camino Q .

2.6. Planificación en el tiempo: Concepto de trayectoria.

La mayoría de los métodos de generación de caminos supone que el camino construido se ejecutará con una velocidad constante lo suficientemente baja para que la dinámica del vehículo afecte lo menos posible al seguimiento del camino. Ante el problema que plantean las aceleraciones inicial y final a las que debe someterse el vehículo para modificar su estado de movimiento, se pondera la referencia de velocidad por una determinada atenuación variable (Nelson y Cox, 1.990).

Sin embargo, a menudo se precisa realizar una planificación de la velocidad que desarrollará el vehículo en su recorrido por el camino construido. A la fusión de una curva de velocidad con el camino especificado se denomina construcción de la trayectoria. Esta se define como el resultado de la composición de una planificación espacial (camino) con otra temporal (curva de velocidad). De esta forma, la trayectoria engloba un conjunto de posturas temporales, las cuales resultan de la suma de una componente de velocidad con cada una de la posturas que conforman el camino.

2.6.1. Necesidad de la planificación de velocidades.

Las razones que determinan la realización de una planificación temporal se originan por la necesidad de satisfacer ciertas restricciones. Estas se agrupan en los dos siguientes conjuntos:

- *Restricciones debidas a las características físicas del vehículo:* Se refieren a las limitaciones impuestas por el comportamiento cinemático y dinámico del robot móvil. Ambos imponen restricciones a la velocidad máxima que puede desarrollar el vehículo según las características del camino que se desea recorrer.
- *Restricciones debidas a requerimientos operacionales:* En misiones donde el robot se encuentra integrado como un elemento más de un sistema más complejo, debe adaptar la velocidad de navegación según los requerimientos de operación de la misión en curso.

El seguimiento de caminos a altas velocidades se ve afectado por la dinámica del vehículo, la cual interfiere en la capacidad del seguidor para llevar a cabo su tarea con el mínimo error posible. El objetivo consiste en planificar una velocidad máxima que según las características del vehículo y del camino proporcionen una navegación segura. Esta puede ser variable con el fin de obtener un mayor rendimiento de la tarea de navegación.

De este modo, en el NavLab II se considera que la principal restricción dinámica del vehículo viene provocada por la aparición de aceleraciones laterales que lo pongan en peligro de vuelco. Por tanto la planificación de velocidades persigue, en este caso concreto, el objetivo de limitar el valor máximo que pueden alcanzar las aceleraciones arriba mencionadas (Shin, 1.990). Dicha restricción se representa como una curva definida en un plano de fase espacio-velocidad, que se divide en una región de velocidades admisibles y en otra de inadmisibles (Shiller y Gwo, 1.991). En otras palabras, determina una cota superior a las velocidades que cumplen la restricción a lo largo del camino especificado (Figura 2.18.a). En el caso de representar varias restricciones en el mencionado plano, la intersección de todas las regiones admisibles que cada una de las restricciones constituye el conjunto de velocidades que pueden planificarse a lo largo del camino (Figura 2.18.b).

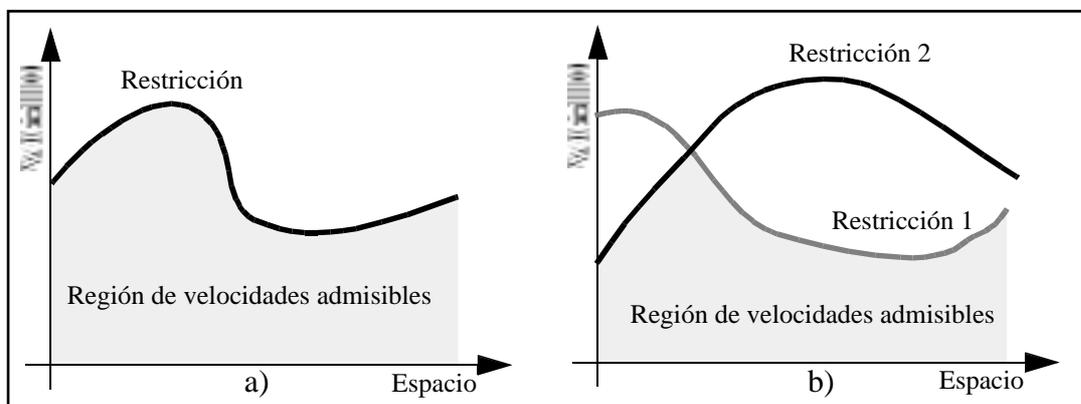


Figura 2.18. Restricciones cinemáticas y dinámicas en el plano de fase espacio-velocidad.

Las restricciones debidas a los requerimientos operacionales persiguen la integración del robot móvil dentro de un sistema más complejo para que aquél realice de forma adecuada los objetivos de operación. Así, el robot móvil debe adaptar su velocidad en cada momento para realizar de modo satisfactorio operaciones como de transporte de material, sincronización con las distintas máquinas en tareas de carga o descarga, o efectuar su trabajo de forma segura cuando se encuentre cerca de operadores humanos (Wilfong, 1.990). Dentro de este tipo de restricciones se plantea el problema que supone evitar los obstáculos móviles cuya trayectoria y tamaño son conocidos. Este es un problema típico en la planificación de trayectorias de una flota de robots móviles cuyos caminos presentan intersecciones. El objetivo se establece en evitar que los robots colisionen.

La realización de la planificación temporal para la solución del problema planteado consiste en la utilización de un plano espacio-temporal, en el cual se representará mediante rectángulos una serie de zonas prohibidas (Kant y Zucker, 1.986; 1.988). Un rectángulo modela un área espacio-temporal inaccesible por el cruce de un obstáculo circular a través del camino construido. Este hecho se muestra en tres fases en la figura 2.19.a. En la primera fase se representa el instante de tiempo t_1 en el cual el móvil intercepta el camino. En la segunda se muestra el segmento de longitud máxima de camino ocupado por el obstáculo en el transcurso de su movimiento. De este modo, dicho segmento queda identificado en la figura por los puntos s_1 y s_2 . Finalmente, en la tercera fase se expone el instante t_2 cuando el obstáculo deja de obstruir el camino. De esta forma, el rectángulo que especifica el área prohibida en el plano espacio-temporal se define por los puntos (s_1, t_1) , (s_2, t_1) , (s_2, t_2) y (s_1, t_2) , como se refleja en la figura 2.19.b.

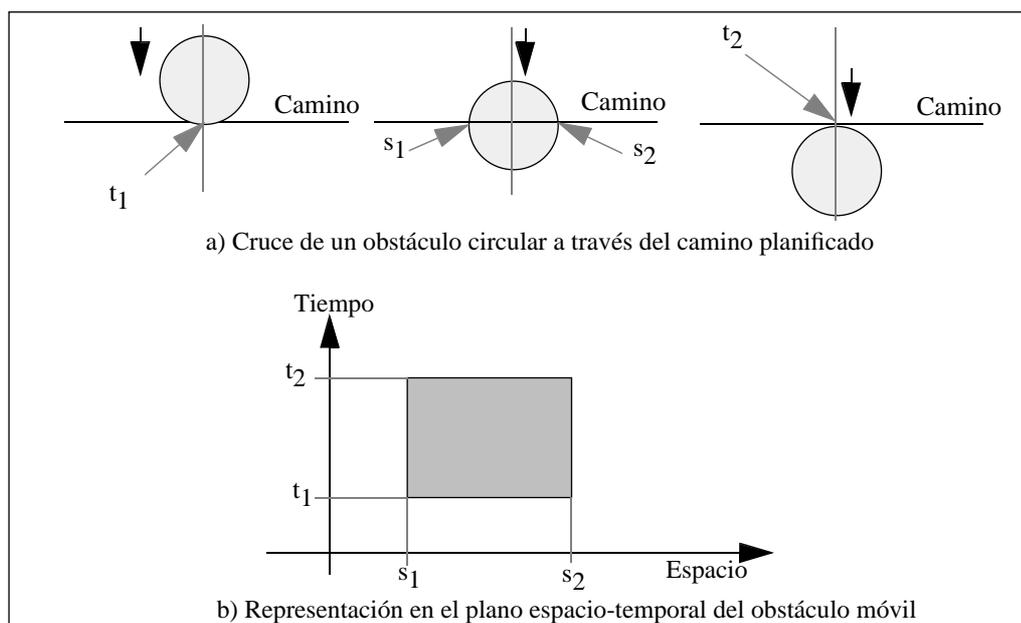


Figura 2.19. Cálculo de una zona prohibida en el plano espacio-temporal.

La planificación de velocidades según la representación descrita permite el uso de métodos de planificación de rutas en el plano, considerando que la ruta resultado debe ser monótona creciente. Como punto de partida se elige el origen del plano espacio-temporal y como destino puede utilizarse cualquier punto de la recta de espacio constante igual a s_f , donde s_f representa la longitud de arco total del camino planificado.

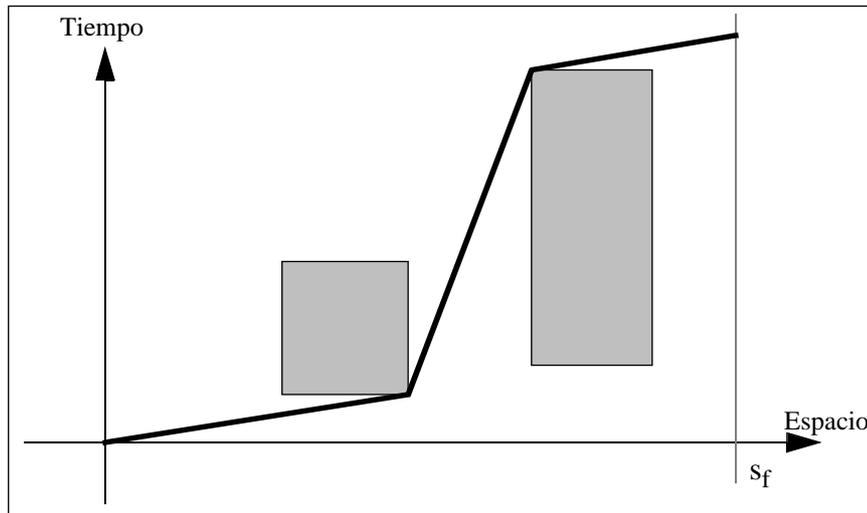


Figura 2.20. Planificación de velocidades en el plano espacio-temporal.

En la figura 2.20 se ha utilizado un método basado en grafos de visibilidad para la realización de la planificación de velocidades. Con esta metodología se precisa especificar una pendiente mínima de cada uno de los segmentos que componen la ruta. Esta pendiente define la velocidad máxima que puede desarrollar el vehículo. En la mencionada figura, en trazo grueso, se plantea una solución al problema de la planificación de velocidades. Por último, si se desea recorrer el camino en un tiempo especificado, se toma como destino el punto de la recta representada en 2.20. que corresponde a la limitación impuesta.

El método descrito para la planificación de velocidades, descansa en el conocimiento del tamaño y la trayectoria de los obstáculos móviles, y la lleva a cabo sobre un camino ya determinado. Otros métodos realizan la construcción de la trayectoria directamente para lograr evitar los obstáculos móviles y no móviles sin especificar en primer lugar un camino que sortee los obstáculos fijos. Para ello, desarrollan una planificación en el espacio, donde se toma el tiempo como tercera dimensión (Fujimura y Samet, 1.988). Los obstáculos se modelan en el espacio tridimensional con los mismos principios que se muestran en la figura 2.19. Tras este paso, se divide el espacio en un conjunto de celdas tridimensionales, notando las que contienen alguna porción de obstáculos como ocupadas. La construcción de la trayectoria se realiza por medio de un conjunto de celdas libres.

2.6.2. Formalización de la planificación de velocidades.

El objetivo consiste en la definición de una función velocidad $V(s)$, parametrizada por su longitud de arco, continua y acotada. Además resulta conveniente que sus dos primeras derivadas (aceleración y sacudidas) presenten las características mencionadas:

$$\begin{aligned} s \in [0, S] \quad V(s) \in C^2 \\ V(s) \in [L_i^v(s), L_s^v(s)] \quad V'(s) \in [L_i^a(s), L_s^a(s)] \quad V''(s) \in [L_i^s(s), L_s^s(s)] \end{aligned} \quad (2.24)$$

donde las funciones $L_i^v(s)$, $L_s^v(s)$, $L_i^a(s)$, $L_s^a(s)$, $L_i^s(s)$ y $L_s^s(s)$ son las cotas inferior y superior de la función velocidad y de sus dos primeras derivadas respectivamente; y donde S especifica la longitud del camino. La representación paramétrica con respecto al espacio recorrido de las cotas aparece motivado por el carácter variable de las mismas a lo largo del camino (debido a las características del camino y del vehículo, o a las restricciones operacionales existentes en cada momento). Se pueden considerar como un conjunto de desigualdades que definen una franja de velocidades admisibles para realizar la navegación a lo largo del camino.

Al igual que en la metodología utilizada en la construcción de un camino se procede a discretizarla como paso posterior a la definición de la función velocidad. El resultado de esta operación se constituye en el conjunto W de los valores que la referencia de velocidad adopta en cada intervalo de control. Considerando $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ como el conjunto de valores utilizados para discretizar $V(s)$, el conjunto W de velocidades discretas se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$W = \{V(s_i) \mid s_i \in S\} = \{v_1, \dots, v_n\} \quad (2.25)$$

La trayectoria \tilde{Q} se construye merced a los valores de configuración y velocidad obtenidos del camino Q y al conjunto W , y resulta de la aplicación biyectiva entre los mencionados conjuntos:

$$\tilde{Q} = QW = \{\tilde{q}_1, \dots, \tilde{q}_n\} / \tilde{q}_i = (q_i, v_i); q_i \in Q, v_i \in W \quad (2.26)$$

2.7. Conclusiones

El objetivo de este capítulo se ha configurado como introducción a las cuestiones que se desarrollarán a lo largo de esta tesis. En primer lugar se ha expuesto la problemática de la navegación, así como la descripción de cada una de las subtarear que se ven involucradas. A este respecto, se han desarrollado en los sucesivos apartados del capítulo las tareas de planificación y generación, ya que ello se conforma como los objetivos de los restantes capítulos de la tesis.

El desarrollo de la tarea de planificación encierra el objetivo de construir una trayectoria libre de obstáculos que conduzca al robot móvil desde la posición inicial hasta la de destino. Esta debe ser admisible, según las características del vehículo, y verificar ciertas restricciones operacionales. Esta tarea se cumplimenta en tres fases diferenciadas: planificación de la ruta, generación del camino y planificación temporal. La primera de estas fases constituye una primera aproximación a la trayectoria final mediante la definición de una ruta libre de obstáculos, construida a partir de la información que se posee del entorno y mediante la aplicación de un método estratégico. En la construcción de la ruta no considera ninguna característica del vehículo, ya que sólo ha de garantizar la continuidad en posición. Por ello, debe recibir un tratamiento que la adecúe para su seguimiento. Este tratamiento es llevado a cabo por la tarea de generación y su resultado consiste en la conversión de la ruta en un camino. Y por otra parte, resulta de la interpolación de una curva sobre ciertos puntos elegidos de la ruta. Resulta de interés que la curva interpoladora posea ciertas características de continuidad en orientación y en curvatura, y sobre todo que esta última se encuentre acotada. La verificación estas limitaciones implica que el camino resultante de la discretización de la curva sea admisible desde el punto de vista cinemático y por tanto utilizable para realizar la tarea de navegación. Por último, al camino se le añade una curva de velocidad para su conversión en trayectoria. La construcción de dicha curva implica cumplir ciertas limitaciones sobre la velocidad debido a las características cinemáticas y dinámicas del vehículo, así como las del camino. De manera opcional se pueden utilizar restricciones operacionales en la construcción de la curva de velocidad, por ejemplo un modelo en que se eviten los obstáculos móviles conocidos.