

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

#### 5.1 CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en éste documento como producto del trabajo realizado demuestran que el problema de los clavos es un problema muy particular y muy difícil de resolver, cuya complejidad radica en el pasaje estrecho formado por el obstáculo para las versiones *1.5*, *1.2* y *1.1* y en el conjunto de rotaciones especiales que el robot debe realizar para salir, de la configuración entrelazada con el obstáculo, en la versión *1.0*.

Para atacar esta complejidad evaluamos diferentes estrategias para generar distintos tipos de configuraciones adecuadas para el robot, las cuales jugaron un papel muy importante en la solución encontrada para las versiones *1.5* y *1.2* y en el avance significativo que se obtuvo para las otras dos versiones del problema de los clavos.

La evaluación de estas estrategias se realizó en términos de su habilidad para generar configuraciones en las regiones más difíciles del espacio de trabajo, tales como aquellas que se encontraban cercanas al pasaje estrecho o bien dentro de él.

Los resultados obtenidos de tales evaluaciones nos permitieron seleccionar los diferentes tipos de configuraciones generados, con el fin de proporcionar características importantes de cada uno de ellos y que nos permitieran posteriormente realizar combinaciones efectivas que nos llevarán a encontrar soluciones para algunas versiones del problema de los clavos.

Estas estrategias nos llevaron al desarrollo de una heurística eficiente que generara un sin número de configuraciones en el pasaje estrecho formado por el obstáculo, para las versiones *1.5*, *1.2* y *1.1* así como configuraciones de cierto tipo, muy adecuadas para intentar resolver la versión *1.0*.

Esta heurística constituye la primera y principal aportación de esta tesis con la cual se intenta solucionar algunas de las diferentes versiones del problema de los clavos. Además de que contribuye como estrategia, en un método eficiente para la generación de configuraciones en pasajes estrechos, que posteriormente podrá ser generalizada para cualquier problema de planeación de movimientos.

Por otra parte el diseño e implementación de los métodos probabilísticos (*PRM*, *OBPRM* y *Visibilidad*) así como las ejecuciones combinadas realizadas con ellos durante el trabajo desarrollado, es otra aportación importante de esta tesis; ya que éstos podrán ser reutilizados en nuevas y futuras investigaciones.

Es importante señalar que las pruebas realizadas con estos métodos nos llevan a pensar que aunque éstos formen parte de su implementación más básica y de carácter general (*para cualquier problema de planeación de movimientos*), lo importante al tratar de solucionar el problema de los clavos es la generación adecuada de configuraciones para el robot, de acuerdo a las características presentes en los objetos.

Las rutas obtenidas para las versiones *1.5* y *1.2* efectivamente desplazaron al robot por el pasaje estrecho formado por el obstáculo, liberándolo de la configuración entrelazada en que se encontraba. Por otro lado el combinar distintas estrategias presentes en la heurística, nos permitió la generación de configuraciones tanto en el pasaje estrecho para la versión *1.1* como algunas configuraciones clave para solucionar en un futuro la versión *1.0*.

Como una aportación más de esta tesis se analizó y diseñó un método que realiza la rotación de un objeto en un espacio tridimensional, utilizando para esto las entidades matemáticas llamadas cuaterniones.

La rotación con cuaterniones, como parte importante de nuestra heurística, resultó ser apropiada para permitirnos rotar al robot con respecto de ejes específicos definidos sobre la superficie del obstáculo, permitiéndonos generar configuraciones adecuadas que nos llevaran a solucionar algunas de las versiones del problema de los clavos.

Por último, podemos concluir que mientras no exista una solución eficiente y computacionalmente viable que resuelva el problema de los clavos, la heurística propuesta en esta tesis, dados los resultados obtenidos, demuestra ser una alternativa poderosa que posiblemente en un futuro resuelva ciertamente éste problema.

## 5.2 TRABAJO FUTURO

Dados los resultados obtenidos en ésta tesis es importante señalar que se ha desarrollado una heurística efectiva que genera configuraciones adecuadas para el robot en el problema de los clavos, las cuales permitieron resolver las versiones *1.5* y *1.2*. Como trabajo futuro se recomienda:

- a) Analizar e implementar nuevas estrategias para la generación de configuraciones adecuadas al problema de los clavos, que complementen la heurística diseñada hasta ahora.
- b) Realizar nuevas combinaciones con las estrategias implementadas en la heurística que generen configuraciones con características especiales que nos lleven a encontrar mejores soluciones.
- c) Intentar solucionar las versiones *1.1* y *1.0* del problema de los clavos generando configuraciones con la heurística mejorada.
- d) Implementar el método probabilístico **RRT** (*Rapidly random tree* por sus siglas en inglés) del *Dr. Steve Lavalle* de la Universidad de Illinois [29], dado que su autor afirma haber resuelto el problema original con éste método.
- e) Realizar nuevas combinaciones de los métodos probabilísticos implementados buscando tanto mejorar las rutas encontradas como encontrar rutas para las versiones *1.1* y *1.0*.

- f) Generar un método para la heurística que combine diferentes rotaciones para el robot en una sola orientación, a través de la multiplicación de cuaterniones de rotación.
- g) Diseñar nuevas estrategias que permitan mejorar la conectividad de los roadmaps construidos por los métodos probabilísticos.
- h) Tal y como se mencionó al final de la sección 4.4, se propone un análisis minucioso del método *Visibilidad* a fin de mejorar su desempeño en la obtención de las rutas aquí mostradas, que nos lleve a reducir los tiempos de ejecución obtenidos.

El análisis podría ser enfocado a optimizar tanto la etapa de selección de configuraciones como la mezcla de componentes desconexos que el método realiza. Por otra parte el método podría ser sustituido por otro de los ya implementados o bien utilizar el *RRT* propuesto en el inciso *d*, designándole los mismos tipos de configuraciones que éste genera o bien incluyéndole otros tipos mejores, de tal forma que se reduzca el número de configuraciones a generar.

Por último proponemos generalizar la heurística diseñada para intentar resolver cualquier problema de planeación de movimientos así como el empleo de los cuaterniones para efectuar las rotaciones de un robot en su espacio de trabajo.