%Resultados experimentales

\chapter{Resultados Experimentales}\label{sec:capitulo6}

\thispagestyle{empty}

\begingroup

\rightskip0.5cm

\small

\hfill\textit{No se puede enseñar nada a un hombre; sólo se le puede ayudar}

\hfill\textit{a encontrar la respuesta dentro de sí mismo.}

\hfill Galileo Galilei\\

\endgroup

El capítulo \ref{sec:capitulo6} presenta los resultados experimentales realizados en el trabajo de pasantía. La validez del algoritmo presentado en el capítulo \ref{sec:capitulo4} es demostrada a través de pruebas experimentales en ambas plataformas descritas en el capítulo \ref{sec:capitulo5}. \\

El presente capítulo se divide en cuatro secciones a saber: Redomas, intersecciones, cambios de carril y pruebas reales. Cada una de ellas presenta los distintos experimentos llevados a cabo en el marco del trabajo de pasantías.\\

El perfil dinámico es una constante en cada uno de los experimentos, sin embargo se evidencia con claridad en la sección \ref{sec:cambiodecarril}, en la cual es crucial este tipo de comportamiento, al ser una situación imprevista de la conducción.\\

\section{Redomas}\label{sec:redomas}

Como se menciona en la sección \ref{sec:decision}, en trabajos previos \cite{bouraoui2011, Resende2012} la adquisición manual del mapa, generaba ruido en la lectura de la curvatura. Esta variable es uno de los parámetros utilizados en el control de vehículos autónomos en la arquitectura presentada, por lo cual fue necesario protegerla contra el ruido.\\

En una primera aproximación, la curvatura presentaba ruido no sólo debido a que el mapa era grabado a mano, sino que tanto el planificador como el controlador necesitaban de una gran cantidad de puntos para operar. Lo anterior implica que sin importar la cantidad de puntos existentes en el mapa, el planificador global agregaba un punto en la trayectoria cada 0.2m, introduciendo aún más ruido en el valor de la curvatura.\\

\begin{figure}[!ht]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:planningViejoz2} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/planningViejoz2}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:planningViejoZoom2} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/planningViejoZoom2}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaVieja2} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.60\textwidth]{imagenes/CurvaturaVieja2}}

\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Mapa de ruta en redoma, generación de puntos más espaciados. En (a), mapa previo para una maniobra en redoma. En (b), área ampliada de la Figura \ref{fig:planningViejoz2} evidenciando la cantidad de puntos en el mapa. En (c), la curvatura filtrada asociada al mapa. }

\label{fig:planningViejo2} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:planningViejo}, se presenta el mapa en trabajos previos, dando evidencia de la cantidad de puntos incluidos en él. Al ser localizado el problema generador de ruido, se procedió a reducir la cantidad de puntos e implementar el filtro de Fourier descrito en la sección \ref{sec:decision}, dando como resultado una mejora en la data de la curvatura.\\

La Figura \ref{fig:planningViejo2} evidencia dicho resultado, donde menos puntos son tomados en cuenta para la misma maniobra y la data de la curvatura es filtrada, sin embargo el ruido continúa presente, siendo necesaria una aproximación diferente.\\

En \cite{Perez2011D,Han2010, Choi2008} se presentan planificadores que toman pocos puntos en un mapa y son capaces de generar trayectorias. Esto implica que la creación de los puntos para el cálculo de la curvatura queda gestionado por los planificadores, utilizando curvas paramétricas y evitando así errores humanos al grabar la trayectoria manualmente. \\

En \cite{TesisPerez2012} se presenta una solución para la generación de trayectorias en redomas con las ecuaciones paramétricas del círculo. Esta proporciona un valor de curvatura constate en todo el recorrido de la redoma.\\

\begin{figure}[!ht]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Redomacircular} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.55\textwidth]{imagenes/Redomacircular}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaRedomaCircular} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.70\textwidth]{imagenes/CurvaturaRedomaCircular}}%\\[10pt]

%----tercera subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:CurvaturaVieja2} %% Etiqueta para la tercera subfigura

%\includegraphics[width=0.60\textwidth]{imagenes/CurvaturaVieja2}}

%\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Mapa de ruta en redoma, generación de puntos más espaciados. En (a), mapa previo para una maniobra en redoma. En (b), área ampliada de la Figura \ref{fig:planningViejoz2} evidenciando la cantidad de puntos en el mapa. En (c), la curvatura asociada al mapa. }

\label{fig:PlanningCircular} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

El resultado de la implementación de dicha generación de trayectoria es mostrado en la Figura \ref{fig:PlanningCircular}. En ella se muestra un valor constante de curvatura para segmentos dentro de la redoma, lo cual es una mejora evidente en la generación de la trayectoria y la adquisición de la curvatura. Además demuestra, que la generación de trayectoria por parte de los planificadores es preferible a una grabada manualmente, reduciendo en gran medida el ruido en la variable curvatura.\\

Tomando \cite{TesisPerez2012} una vez más como referencia, se elimina la mayoría de los puntos que describen los segmentos rectos, quedando únicamente dos (Un punto al inicio del segmento y un punto al final); eliminando así el ruido de curvatura en segmentos rectos. Además en la Figura \ref{fig:Redoma&rectas}, es visible que el mapa requerido por los planificadores es mucho más reducido (Llegando a 3 puntos como se plantea en la sección \ref{sec:decision}).

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.45]{Imagenes/Redoma&rectas}

\caption{Mapa y planificación utilizando las ecuaciones paramétricas del círculo.}

\label{fig:Redoma&rectas}

\end{center}

\end{figure}

Con la utilización de este nuevo mapa, se toman los puntos en el medio de la vía, ya que el planificador es el encargado de la proyección de éstos al respectivo carril a recorrer. En el trabajo de pasantías sólo dos canales fueron utilizados, sin embargo, las bases han sido sentadas para la utilización de n canales, debido a que el mapa permite asimilar dicha información como una característica más de las que ya posee.\\

A pesar de los avances presentados, es claro que tanto la entrada como la salida de la redoma poseen cruces bruscos. En \cite{Perez2013} es presentada una generación de curvas de Bézier, que son utilizadas para suavizar la entrada y la salida de redomas. Dicha generación solamente considera un mapa de tres puntos (Inicio, punto redoma, fin), en una generación de trayectoria totalmente delegada a los planificadores. La implementación de dicha técnica en la Figura \ref{fig:Beziermalo}, da evidencia del alto valor informativo que representa ahora la curvatura, ya que su valor es suave, sin saltos mayores y acorde a la trayectoria generada, evitando así cruces bruscos.\\

\begin{figure}[!ht]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:MalbezierZ} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/MalbezierZ}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:MalbezierZoom} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/MalbezierZoom}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaMalBezier} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.60\textwidth]{imagenes/CurvaturaMalBezier}}

\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Planificación utilizando curvas de Bézier para suavizado de giros bruscos. En (a), planificación de entrada a redoma. En (b), se detalla la discontinuidad de la curva debido a los puntos de control. En (c), Curvatura de la trayectoria descrita en a.}

\label{fig:Beziermalo} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

Es importante destacar que la utilización de la curva de Bézier implementada en \cite{Perez2013}, genera una discontinuidad al final de la curva y al inicio de la generación paramétrica de la redoma. Esto es evidenciado en la Figura \ref{fig:MalbezierZoom}, y ocurre debido al posicionamiento de los puntos de control referentes a la curva de Bézier, ya que éstos no garantizan una continuidad en el ángulo tangente al punto $P\_3$.\\

\begin{figure}[!ht]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Bezierbuenoc} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/Bezierbuenoc}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:BezierbuenoZoom} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/BezierbuenoZoom}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaBezierbueno} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.60\textwidth]{imagenes/CurvaturaBezierbueno}}

\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Planificación utilizando curvas de Bézier para suavizado de giros bruscos. En (a), planificación de entrada a redoma. En (b),se detalla la generación de la curva con los nuevos puntos de control. En (c), Curvatura de la trayectoria descrita en a. }

\label{fig:Bezierbueno} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

Como explicado en el capítulo 4, la presente arquitectura de control propone una solución al problema, la cual se basa en la igualación del ángulo de dirección en el punto $P\_3$. Esta igualación permite que la curva de Bézier realice una transición suave hacia la curva paramétrica circular, donde dicha transición es alcanzada al colocar el punto $P\_2$ a 6m del punto $P\_3$ sobre dicha recta tangente, como se muestra en la Figura \ref{fig:Bezierbueno}.\\

Luego que la generación de una trayectoria suave es lograda, el siguiente paso es el control lateral del vehículo. Con una velocidad promedio de 4m/s, el control del \textit{Cycab} virtual es capaz de obtener los resultados mostrados en las figuras \ref{fig:ControlRedoma} y \ref{fig:VariablesControlRedoma}.

\begin{figure}[!ht]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:ControlRedoma} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.5\textwidth]{imagenes/ControlRedoma}}\\[10pt]

%\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:LateralRedoma} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/RuedasRedoma}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:CurvaturaControlRedoma} %% Etiqueta para la tercera subfigura

%\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/CurvaturaControlRedoma}}

%\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Control del \textit{Cycab} virtual en redomas. En (a), comportamiento del vehículo en la trayectoria planeada. En (b), comportamiento de las ruedas directoras en el tiempo.}

\label{fig:ControlRedoma} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:AngularRedoma} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/AngularRedoma}}\\[10pt]

%\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:LateralRedoma} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/LateralRedoma}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaControlRedoma} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/CurvaturaControlRedoma}}

%\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Variables de control del \textit{Cycab} virtual en redomas. En (a), el error angular. En (b), el error lateral. En (c), la curvatura asociada al control en el tiempo. }

\label{fig:VariablesControlRedoma} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

Éstas muestran tres variables de control como explicado en la sección \ref{sec:control}: la curvatura, el error angular y el error lateral, donde el signo determina el sentido del giro. Especial atención debe ser dirigida hacia la variable error lateral, ya que presenta un error máximo menor a 0.4m, y hacia la variable curvatura, ya que es suave con respecto a trabajos previos, indicando la validez del modelo utilizado en la arquitectura de control.

\section{Intersecciones}

En \cite{Perez2013} se presenta una solución al problema de las intersecciones, las cuales son tratadas nuevamente con curvas de Bézier. La generación de la curva está siempre determinada por los puntos de control, lo que implica que su diseño se ve condicionado a la colocación conveniente de dichos puntos, y así, solucionar el problema presentado.\\

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:InterseccionBezierz} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/InterseccionBezierz}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:InterseccionBezierZoom} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/InterseccionBezierZoom}}%\\[10pt]

%----tercera subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:CurvaturaControlRedoma} %% Etiqueta para la tercera subfigura

%\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/CurvaturaControlRedoma}}

%\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Generación de trayectoria del \textit{Cycab} virtual en intersecciones. En (a), la planificación de la trayectoria. En (b), zoom del área generada por la curva de Bézier.}

\label{fig:InterseccionBezier} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

En el presente trabajo, la curva de Bézier para intersecciones se utiliza como descrito en el capítulo 4. Cuatro puntos de control sobre los segmentos que conforman la intersección, son los responsables de generar la curva. En la Figura \ref{fig:InterseccionBezier} se presenta la trayectoria generada a tiempo real. \\

Por otro lado, el control del vehículo en el seguimiento de la trayectoria generada se presenta en la Figura \ref{fig:ControlInterseccion}. En ella se muestra la posición del vehículo con una línea azul, al momento de seguir la trayectoria presentada con asteriscos rojos.\\

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.45]{Imagenes/ControlInterseccion}

\caption{Control del \textit{Cycab} virtual en el seguimiento de trayectoria.}

\label{fig:ControlInterseccion}

\end{center}

\end{figure}

El control del vehículo se realizó con las mismas tres variables de control: error angular, lateral y curvatura, como se muestra en la Figura \ref{fig:VariablesControlInterseccion}. En ellas es importante notar que al momento de seguir la trayectoria, el vehículo posee un error lateral máximo menor a 0.5m, y una curvatura suave, lo que indica un control acertado en cuanto al manejo autónomo en intersecciones. Es importante tener en cuenta que el control lateral es realizado tomando como referencia el punto de control adelantado (Ver sección \ref{sec:control}).

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:AngularInterseccion} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/AngularInterseccion}}\\[10pt]

%\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:LateralInterseccion} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/LateralInterseccion}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaControlInterseccion} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/CurvaturaControlInterseccion}}

%\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Variables de control del \textit{Cycab} virtual en intersecciones. En (a), el error angular. En (b), el error lateral. En (c), la curvatura asociada al control en el tiempo.}

\label{fig:VariablesControlInterseccion} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

\section{Cambios de carril}\label{sec:cambiodecarril}

En \cite{Perez2013, Perez2011D}, el cambio de carril es presentado como un cambio de referencia en el radio de la redoma. Al momento de la planificación, el siguiente punto a ser generado por las ecuaciones paramétricas del círculo, posee un radio distinto, lo cual ocasiona un salto en la trayectoria, provocando un giro brusco.\\

Los cambios de carril en redomas son tomados en el trabajo de pasantía como una reacción a una situación imprevista. La necesidad de un cambio de carril en el presente trabajo es determinada por el operador, el cual puede en cualquier momento solicitar un cambio dentro de la redoma.\\

La capacidad de realizar el cambio de carril es importante para validar la característica dinámica de la arquitectura presentada. Una primera aproximación al problema, implementa la solución propuesta en \cite{Perez2013, Perez2011D}, como se muestra en la Figura \ref{fig:Cambiocarril}.\\

En ella, se muestra un primer cuadro (Ver Figura \ref{fig:Cambiocarril1V}), en el cual es presentado el cálculo de trayectoria para una redoma en el instante de tiempo $t$. Con asteriscos azules se describe la trayectoria que ha recorrido el vehículo y con asteriscos verde claro, se describe la trayectoria planificada a recorrer. Esta última se encuentra alojada en el \textit{buffer}, esperando a ser leída.\\

Para el instante de tiempo $t$, el operador demanda un cambio de carril, el cual es procesado por la arquitectura de control. Luego, en el tiempo $t+\Delta t$, el planificador local ha descartado la trayectoria predefinida, reemplazándola por una nueva, como se muestra en la Figura \ref{fig:Cambiocarril2V}.\\

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Cambiocarril1V} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/Cambiocarril1V}}%\\[10pt]

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Cambiocarril2V} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/Cambiocarril2V}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Cambiocarril3V} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/Cambiocarril3V}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:controlcambiocarril1} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/controlcambiocarril1}}

\caption{Secuencia en la planificación local para el cambio de carril. En (a), la primera trayectoria calculada. En (b), la trayectoria eliminada del \textit{buffer} y sustituida por un cambio de carril. En (c), el recorrido finalizado. En (d), seguimiento de la trayectoria.}

\label{fig:Cambiocarril} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

Por último, el vehículo sigue la nueva trayectoria hasta su punto de destino. En las Figuras \ref{fig:Cambiocarril3V} y \ref{fig:controlcambiocarril1}, es importante notar que el vehículo ha planificado exitosamente la trayectoria a través de la ruta dada por el planificador global, y además es capaz de planear la salida de la redoma desde el canal interior. Todo esto con las mismas especificaciones para la creación de curvas de Bézier de entrada y salida de redomas, utilizadas en la sección \ref{sec:redomas}.\\

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:AngularCambiodecarril1} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/AngularCambiodecarril1}}\\[10pt]

%\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:LateralCambiodecarril} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/LateralCambiodecarril}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaCambiodecarril} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/CurvaturaCambiodecarril}}

%\hspace{0.05\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:controlcambiocarril1} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/controlcambiocarril1}}

\caption{Variables de control en el cambio de carril. En (a), el error angular. En (b), el error lateral. En (c), la curvatura asociada.}

\label{fig:VariablesCambiocarril} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:VariablesCambiocarril} se presentan las variables de control utilizadas dentro del cambio de canal. Éstas se comportan con valores comunes, sin embargo, el segundo 16 presenta una variación importante, ya que el salto entre un carril y otro de la redoma crea un segmento que genera saltos en las variables de control. \\

Para el error angular \ref{fig:AngularCambiodecarril1}, se presenta un cambio súbito a 1.56rad. Para el error lateral, el cambio es aproximado a los 3m de distancia, mientras que para la curvatura el efecto es inverso ya que su valor cambia bruscamente de 0.9 a 0.05, debido al cambio de concavidad.\\

Estos valores representan un salto en el control de las ruedas directoras, que, al no ser suave, genera incomodidad en el seguimiento de la trayectoria, y es visible en la Figura \ref{fig:RuedasCambiodecarril1}.\\

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.40]{Imagenes/RuedasCambiodecarril1}

\caption{Valor del giro de las ruedas directoras en radianes.}

\label{fig:RuedasCambiodecarril1}

\end{center}

\end{figure}

En ella se ve que el vehículo gira a su máxima capacidad (0.5rad como explicado en la sección \ref{sec:actuacion}), lo cual implica una discontinuidad en la conducción e incomodidad para los pasajeros.

En la arquitectura propuesta, las curvas de Bézier ayudan al incremento de la suavidad al momento del cambio de carril. Con los lineamientos explicados en la sección \ref{sec:local} y la dinamicidad previamente explicada, el algoritmo propuesto es capaz de gestionar los cambios de carril de la forma que muestra la Figura \ref{fig:Cambioconbezier}

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Cambiodecarrilbezier} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/Cambiodecarrilbezier}}

\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:controlcambiodecarrilbezier} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/controlcambiodecarrilbezier}}%\\[10pt]

%----tercera subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:CurvaturaControlRedoma} %% Etiqueta para la tercera subfigura

%\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/CurvaturaControlRedoma}}

%\hspace{0.1\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:C3} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.41\textwidth]{imagenes/C3}}

\caption{Generación de trayectoria del \textit{Cycab} virtual en cambios de carril utilizando curvas de Bézier. En (a), la planificación de la trayectoria. En (b), la posición del vehículo al recorrer la trayectoria.}

\label{fig:Cambioconbezier} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:Cambiodecarrilbezier}, se presenta la planificación de dos cambios de carril consecutivos, donde los asteriscos azules representan la planificación local, los asteriscos morados representan las trayectorias descartadas (dos, ya que hubo dos cambios de carril). En esta figura es visible que, con la curva de Bézier, es posible planificar una ruta segura a seguir.\\

En la Figura \ref{fig:controlcambiodecarrilbezier}, se presenta la posición del vehículo al seguir la trayectoria planificada. Dicha posición en azul, siempre sigue la trayectoria mostrada con asteriscos rojos, los cuales representan la planificación local. En esta figura es visible que el vehículo completa el recorrido exitosamente, incluyendo las maniobras de cambio de carril.\\

\begin{figure}[H]

\centering

%%----primera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:Angularccbezier} %% Etiqueta para la primera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/Angularccbezier}}\\[10pt]

%\hspace{0.05\linewidth}

%%----segunda subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:LateralCambiodecarril} %% Etiqueta para la segunda subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/Lateralccbezier}}\\[10pt]

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

\label{fig:CurvaturaCambiodecarril} %% Etiqueta para la tercera subfigura

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{imagenes/curvaturaccbezier}}

%\hspace{0.05\linewidth}

%%%----cuarta subfigura----

%\subfloat[]{

%\label{fig:controlcambiocarril1} %% Etiqueta para la cuarta subfigura

%\includegraphics[width=0.45\textwidth]{imagenes/controlcambiocarril1}}

\caption{Variables de control en el cambio de carril utilizando curvas de Bézier. En (a), el error angular. En (b), el error lateral. En (c), la curvatura asociada.}

\label{fig:ccbezier} %% Etiqueta para la figura entera

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:ccbezier} se presentan las variables de control referentes al seguimiento de trayectoria en cambios de canal, utilizando curvas de Bézier. Tanto en la Figura \ref{fig:Angularccbezier}, como en la Figura \ref{fig:LateralCambiodecarril}, se presenta el error angular y el error lateral respectivamente. En estos vemos cambios menos bruscos de las variables de control al momento del cambio de carril, en comparación con el método anterior.

En cuanto al error angular, éste posee un valor máximo de 0.78rad, lo cual es una mejora frente al método anterior. El error lateral posee una mejora similar, al tener un valor máximo de 0.82m.

Por otro lado, la curvatura presenta diferencias visibles con respecto al método anterior (Ver Figura \ref{fig:CurvaturaCambiodecarril} y \ref{fig:CurvaturaCambiodecarril}). Esto es debido a que el uso de la curva de Bézier es coherente con el comportamiento de la redoma, a diferencia del método anterior, realizando una transición suave entre carril y carril.

\begin{figure}[!ht]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.40]{Imagenes/Ruedasccbezier}

\caption{Valor del giro de las ruedas directoras en radianes (cambio de carril utilizando curvas de Bézier).}

\label{fig:Ruedasccbezier}

\end{center}

\end{figure}

A pesar que el cambio de valor en la curvatura es rápido, el \textit{Cybercar} es capaz de realizar los giros necesarios para el cambio de canal con una mayor suavidad que el método anterior (Ver Figura \ref{fig:RuedasCambiodecarril1} y \ref{fig:Ruedasccbezier}). De esta manera se demuestra que la utilización de las curvas de Bézier para cambios de carril es una mejora dentro de la arquitectura presentada.

\section{Pruebas Reales}

A pesar de que la mayoría de las pruebas en vehículos reales quedarán en trabajos futuros, es importante resaltar que en el marco del trabajo de pasantía, dichas pruebas fueron realizadas en las instalaciones del grupo receptor, con el \textit{Cycab}.\\

Gracias a la modularidad de la arquitectura propuesta, la implementación de esta en la plataforma real fue exitosa. \\

No tengo mucha idea de que decir exactamente aquí, yo creo que lo quitaría......... las pruebas fueron realizadas, pero no tengo la data, sólo el video.

\section{Resumen}

Los resultados experimentales del trabajo de pasantías, se muestran en el presente capítulo. En ellos la curvatura suave es uno de los parámetros añadidos al control, luego de realizar mejoras en la planificación del mapa, para la obtención de ella.\\

Una generación de trayectoria en suave y segura, basada en curvas paramétricas es presentada y validada para redomas, mostrando detalladamente cada una de sus fases: entrada, medio y salida.\\

La validez de un algoritmo para la generación de trayectoria en intersecciones es comprobada. En esta, el vehículo es capaz de realizar la planificación y el seguimiento de trayectorias generadas por el algoritmo presentado.\\

Por último, se presenta una gestión de cambio de carril dentro de una redoma, donde se comparan trabajos previos con la solución presentada en el trabajo de pasantías. Esta última se basa en las curvas de Bézier para realizar un cambio de carril seguro.\\

La dinamicidad de la arquitectura es presentada y validada en los cambios de carril. Esto demuestra que las bases para un manejo dinámico de situaciones imprevistas en la conducción, han sido sentadas y validadas.