%Arquitectura de Control

\chapter{Arquitectura de Control}\label{sec:capitulo4}

\thispagestyle{empty}

A partir de las contribuciones mostradas en el capítulo 3 y los trabajos previos del grupo Imara en \cite{Resende2012, bouraoui2011}, el capítulo 4 presenta una nueva arquitectura de control modular y adaptable para Sistemas Cibernéticos de Transporte (CTSs, del inglés: \textit{Cybernetic Transportation Systems}). Esta nueva arquitectura utiliza curvas paramétricas para generar trayectorias a tiempo real, que sean suaves y seguras para los usuarios. Además, considera escenarios urbanos, como cruces, redomas y cambios de canal dentro de ellas, presentando así soluciones a algunos de los problemas más interesantes dentro de los CTSs, en específico, de los {Cybercars}\cite{Mehani2007,Perez2011D}.\\

La modularidad de la arquitectura es una de las líneas de diseño más fuertes, lo cual permite la adaptabilidad del sistema a distintos ambientes computacionales. Por otro lado, la mayor contribución del presente trabajo se refleja en el generador dinámico de trayectoria, el cual considera las condiciones del vehículo, de la infraestructura y de los obstáculos para definir, a tiempo real, el camino a seguir y las rutas alternas.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.80]{Imagenes/arquitectura}

\caption{Diagrama de la arquitectura de control propuesta}

\label{fig:arquitectura}

\end{center}

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:arquitectura} se presenta la estructura completa de la arquitectura de control. En ella vemos seis etapas bien definidas: adquisición, percepción, comunicación, decisión, control y actuación. Cada una de las etapas será explicada, sin embargo, se pretende profundizar en la decisión y el control, las cuales concentran el enfoque del trabajo de pasantía.

\section{Adquisición}

La etapa de adquisición hace referencia a la recopilación de data proveniente del entorno del vehículo (Parte superior izquierda de la Figura \ref{fig:arquitectura}). La adquisición puede ser vista como los “sentidos” del vehículo, ya que por medio de sensores, además del CAN (Red Controladora del Área, del inglés: \textit{Controller Area Network}) de bajo nivel y el procesamiento de señales, el vehículo puede conocer su ubicación y modelar su entorno.

\subsection{Sensores}

Cámaras de visión artificial, GPSs diferenciales (Sistemas de posicionamiento global, del inglés: \textit{Global Positioning Systems}), unidades de medición inercial (IMU, del inglés: \textit{Inertial Measurement Unit}) y Lidar (Detección de Luz y Distancia, del inglés: \textit{Light Detection And Ranging}), son sólo algunos de los sensores que se implementan hoy en día en materia de los CTSs, específicamente embarcados en los \textit{Cybercars}. \\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

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

\caption{Sistema de visión artificial y Lidar para un \textit{Cycab}}

\label{fig:CycabLidar}

\end{center}

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:CycabLidar} se muestra el sistema de algunos sensores del \textit{Cycab}. Con respecto a los sensores utilizados en simulaciones, éstos están referenciados en el capítulo 5, específicamente en la sección de simulaciones, donde se hace referencia a la plataforma virtual utilizada para el trabajo de pasantía (Pro-sivic).

\subsection{Can de bajo nivel}

El CAN, es un protocolo de comunicación serie orientado a mensajes multiplexados por una red entre uno o varios dispositivos maestros o \textit{masters}, y varios esclavos o \textit{slaves}. A la hora del envío del mensaje, éste se encapsula con identificadores, y es enviado a través de la red, siendo aceptado únicamente por los nodos a los que va dirigido. Es capaz de corrección y retransmisión de tramas erróneas, desconexión automática de nodos defectuosos, prioridad de mensajes, entre otras. El protocolo CAN es altamente utilizado en la industria automotriz, ya que disminuye la cantidad de cableado gracias a su característica multimensaje, reduciendo el cableado punto a punto, excepto entre nodos.\\

La información de la odometría (La velocidad del vehículo, el ángulo de dirección, y varias señales operativas) es enviada por el protocolo CAN. Esta red embarcada representa la comunicación entre el procesador central, sensores y actuadores.

\section{Percepción}

Una vez que la información del entorno y del estado del vehículo ha sido recolectada por la etapa de adquisición, se envía a la etapa de percepción. En ella, la información es procesada para obtener un modelo claro del entorno y del vehículo. En trabajos anteriores se puede ver la utilización de la información proveniente de GPSs diferenciales y de IMU, fusionados con un filtro Kalman para la localización de \textit{Cybercars}\cite{Rong2008}. \\

Recientes investigaciones apelan por la utilización de escáneres láser, cuya información es posteriormente fusionada y procesada para el cálculo de la posición en distintos escenarios\cite{JianpingXie2010}, así como también para la localización de obstáculos. Dicha técnica se denomina SLAM (Localización y mapeo simultáneo, del inglés: \textit{Simultaneous Localization and Mapping}).\\

En la presente arquitectura de control, los parámetros son procesados y enviados a la etapa de decisión en coordenadas cartesianas, lo que permite la transición entre plataformas experimentales, evidenciando la modularidad del sistema.

\section{Comunicación}

Hoy en día, la interacción entre dispositivos electrónicos es una realidad. La etapa de comunicación permite enviar y recibir información, especialmente de otros vehículos para ser procesada en la etapa de decisión. En \cite{Bouraoui2006a}, los vehículos están conectados por medio de una red descentralizada o \textit{mesh network}, a través de WIFI, con protocolo OLSR Ad-Hoc (Enrutamiento de enlaces optimizados, del inglés: \textit{Optimized Link State Routing}).\\

Comunicaciones Vehículo-a-Vehículo (V2V, del inglés: \textit{Vehicle to Vehicle}) y Vehículo-a-Infraestructura (V2I, del inglés: \textit{Vehicle to Infrastructure}) son utilizadas para informar sobre la posición, la velocidad, la aceleración, entre otras características. En el alcance del presente trabajo de pasantías sólo fue contemplado un vehículo, sin embargo, la arquitectura presentada en la Figura \ref{fig:arquitectura} contempla esta fase, permitiendo que en trabajos futuros sea añadida como parte de la implementación en diferentes maniobras; especialmente en aquellas que necesitan una generación dinámica de trayectoria al considerar dos o más vehículos.

\section{Decisión}\label{sec:decision}

La etapa de decisión merece la mayor atención dentro de la arquitectura de control, ya que es la contribución principal del presente trabajo (Parte inferior derecha de la Figura \ref{fig:arquitectura}). Esta fase recibe la data procesada previamente en la etapa de percepción, además de recibir información de la base de datos y la interfaz hombre-máquina (HMI, del inglés:\textit{ Human-Machine Interface}).\\

Se basa en el procesamiento del planificador global y el planificador local, capacitando al vehículo para la conducción autónoma, específicamente en la planificación de la ruta a seguir. Además permite al vehículo lidiar con situaciones imprevistas que comúnmente afectan la conducción, algunas de ellas son: cruce de peatones, trabajos en la vía, obstáculos y comandos del operador.\\

A pesar que no todos los escenarios anteriormente mencionados están previstos en la arquitectura de control, las bases para cada uno de ellos han sido consideradas en el diseño modular, dejando abierta la posibilidad para futuras implementaciones. En específico dos escenarios fueron considerados: intersecciones urbanas y redomas.\\

Como expresado al principio del capítulo, la presente arquitectura de control parte de trabajos previos del grupo Imara \cite{Resende2012, bouraoui2011}. En ellos, el planificador es implementado como un manejador del mapa prestablecido en la base de datos. De esta manera, la ruta a seguir consistía de una gran cantidad de puntos grabados a mano en los vehículos, esto es, un punto virtual de trayectoria cada 0,3s en trayectos urbanos de más de 100m a una velocidad promedio de 1.5m/s.\\

\begin{figure}[!ht]

\centering

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

\subfloat[]{

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

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

\hspace{0.05\linewidth}

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

\subfloat[]{

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

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

%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

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

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

\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, pregrabado manualmente. En (a), mapa previo para una maniobra en redoma. En (b), área ampliada de la Figura \ref{fig:planningViejoz} evidenciando la cantidad de puntos en el mapa. En (c), la curvatura asociada al mapa. }

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

\end{figure}

Uno de los objetivos del presente trabajo de pasantía es la obtención de un buen control lateral, el cual es alcanzado a través de la generación de una trayectoria coherente, segura y suave, tomando en cuenta las variables necesarias para el control del vehículo. Una de las variables tomadas en cuenta como aporte de esta arquitectura modular, es la curvatura de la vía. Ésta se calcula a partir de los puntos de trayectoria en tramos curvos. En la Figura \ref{fig:planningViejo} es evidente que los trabajos anteriormente mencionados no implementaron dicha variable, debido a que la ruta fue grabada a mano, lo cual introduce ruido en el cálculo de la curvatura.\\

Por otro lado, al considerar situaciones imprevistas como cruces de peatones, obstáculos en la vía, entre otros, los trabajos anteriores (debido a que la ruta era pregrabada) no eran capaces de generar dinámicamente una trayectoria más apropiada, limitando a los vehículos a paradas de emergencia.\\

Partiendo de las premisas previas, es claro que era necesaria la implementación de una nueva arquitectura de control que contemplara dichas variables y situaciones. Para esto, una de las primeras modificaciones fue la reducción del mapa prestablecido en la base de datos, dando libertad al vehículo de generar la trayectoria a seguir. \\

A continuación se explican los tres módulos que conforman la etapa de decisión, éstos son el planificador global, el planificador local y el modo de manejo.

\subsection{Planificador global}

El módulo de planificación global se encarga de realizar una primera aproximación de la ruta a seguir por el vehículo. Dicha aproximación toma en cuenta todo el mapa, sin embargo, lo enviado al módulo de planificación local sólo será del punto de partida al punto destino. Este último es recibido a través del módulo HMI (Ver centro-derecha de la Figura \ref{fig:arquitectura}).\\

El planificador global es capaz de crear un riel virtual, a partir del mapa provisto, para la conducción autónoma de \textit{Cybercars}. El mapa utilizado posee una modificación a trabajos previos en el equipo Imara; éste consta sólo de los puntos necesarios para describir la vía.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.60]{Imagenes/MapaNuevoVisio}

\caption{Nuevo mapa implementado en la arquitectura de control}

\label{fig:mapanuevo}

\end{center}

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:mapanuevo} se presenta un mapa de tres puntos (Inicio, punto redoma, punto final). Es claro que el modelo del mapa es mucho más reducido que los anteriormente utilizados, lo cual aumenta la velocidad de procesamiento y disminuye en gran cantidad la memoria utilizada por la base de datos. Por otro lado, este nuevo mapa posee características especiales para cada punto, siendo capaz de describir la clase de segmento que se presenta en la ruta, e.g. el punto redoma presentado.\\

A continuación se presenta el mapa de la Figura \ref{fig:mapanuevo} con el nuevo formato para la generación de trayectorias:\\

\noindent

\textit{$<$network$>$}\\

\hspace\*{20pt}\textit{$<$link$>$}\\

\hspace\*{40pt}\textit{$<$node id=``1'' x=``-2.5'' y=``0'' speed=``5'' $><$/node$>$}\\

\hspace\*{40pt}\textit{$<$node id=``2'' x=``-7.0'' y=``-34.5'' speed=``5'' type=``-1'' radius=``10.58489'' $><$/node$>$}\\

\hspace\*{40pt}\textit{$<$node id=``3'' x=``40'' y=``-43.5'' speed=``5'' type=``-2'' $><$/node$>$}\\

\hspace\*{20pt}\textit{$<$/link$>$}\\

\textit{$<$/network$>$}\\

El nuevo formato es presentado en lenguaje de marcas extensible (XML, del inglés: eXtensible Markup Language), con el cual es posible asignar características a los puntos. Algunas de las utilizadas comprende al \textit{id}, que es la identificación del nodo o punto en números, coordenadas \textit{x} y \textit{y} para la localización del punto, \textit{speed} que da un perfil de velocidad al segmento descrito, \textit{type}, el cual da una idea al planificador de la descripción del punto, si es de tipo redoma será ``-1'' y si es de tipo cruce o intersección, el valor será ``-2''; por último tenemos \textit{radius} que señala el radio externo de una redoma. \\

El formato previamente descrito da mayor libertad de creación y procesamiento de la ruta a los planificadores. Éstos tienen que transformar los puntos del mapa en rutas suaves y seguras. Por su parte, el planificador global traduce el mapa a una primera ruta de referencia, sin suavidad entre distintas calles, pero realizando una primera aproximación al problema de generación de trayectorias en redomas, como en \cite{Perez2013,TesisPerez2012}. En la Figura \ref{fig:FlujogramaGlobal} se evidencia el flujograma global del presente módulo.\\

\begin{figure}%[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.50]{Imagenes/FlujogramaGlobal}

\caption{Flujograma del código del planificador global}

\label{fig:FlujogramaGlobal}

\end{center}

\end{figure}

Dicha aproximación al problema de las redomas se basa en la utilización de las curvas paramétricas del círculo, únicamente para casos en los cuales las redomas son completamente circulares. Dichas curvas paramétricas se presentan en la ecuación \ref{eq:curvascirculo}, donde $x\_{(t)}$ y $y\_{(t)}$ son las coordenadas de los puntos generados, \textit{r} es el radio de la circunferencia, o redoma en este caso, t $\in [0,2\pi]$ y ($x\_{o}$, $y\_{o}$) es el punto central de la redoma.

\begin{subequations}\label{eq:curvascirculo}

\begin{align}

x\_{(t)}=r\cdot cos(t)+x\_{o}\\

y\_{(t)}=r\cdot sen(t)+y\_{o}

\end{align}

\end{subequations}

En la presente generación de la trayectoria, el planificador global únicamente tomará dos puntos en tramos rectos (el inicio y el final del tramo), ya que no es necesario más que esto para definirlos. Por el contrario, en tramos curvos como las redomas, se definirá un punto cada 0.5m, proporcionando así una descripción acertada del camino a seguir.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.60]{Imagenes/GlobalPlanning}

\caption{Planificación Global a partir del mapa presentado en la Figura \ref{fig:mapanuevo}}

\label{fig:GlobalPlanning}

\end{center}

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:GlobalPlanning} se ve un ejemplo del procesamiento entregado por el planificador global. En ella vemos que los puntos amarillos definen los tramos rectos de la ruta (sólo dos por tramo), sin embargo, la línea punteada azul define el tramo dentro de la redoma. Los bordes del camino están señalados por las líneas naranja, rojas y negras.

\subsection{Planificador local}\label{sec:local}

%%Una vez recibida la primera aproximación de la ruta, descrita por el planificador global, el presente módulo se encargará de suavizar la ruta, convertirla en una trayectoria suave y segura, y gestionar los sucesos inesperados que normalmente afectan la conducción. \\

Considerando la información proveniente de módulos como el planificador global, la HMI, la base de datos y el módulo de fusión de data, el planificador local procede a calcular, a tiempo real, una trayectoria, suave y segura, a seguir por la etapa de control. La curvatura de la vía será considerada, siendo ésta uno de los aportes de la presente arquitectura.\\

Además, posee una característica llamada ``Generador Dinámico de Trayectoria’’, el cual es la mayor contribución del presente trabajo, puesto que es capaz de manejar a tiempo real situaciones imprevistas de la conducción. Finalmente éste módulo comparte la información de la trayectoria a través de una cola o \textit{buffer}.\\

El planificador local apunta a suavizar las intersecciones. Como visto en el planificador global, una primera aproximación a la trayectoria fue hecha, sin embargo las intersecciones o uniones entre diferentes calles no han sido suavizadas. A través del generador dinámico de trayectoria, dos problemas principales son tratados: los cruces y las redomas.\\

Como se reseña en el capítulo 3, trabajos previos señalan la utilización de las curvas de Bézier, para evitar los cruces bruscos y crear así trayectorias suaves \cite{Choi2008, Yang2010, Perez2013}. Sin embargo la utilización de las curvas de Bézier en el trabajo de pasantías surge de argumentos presentados en \cite{Han2010, Montes2007}, los cuales detallan la superioridad de las curvas de Bézier, en tiempo de procesamiento y en versatilidad, frente a otras como las curvas polinómicas, las curvas \textit{splines} y las \textit{clothoids}.\\

Basado en lo anterior, la curva de Bézier es la herramienta utilizada en cruces e intersecciones, logrando una transición suave entre un segmento y otro. En la ecuación \ref{eq:Beziern3} se presenta la base del generador dinámico de trayectoria, es decir, la curva de Bézier de tercer grado, donde $B\_{(t)}$ son los puntos generados de la curva, $t\in[0,1]$ y $P\_{i}$ son los puntos de control. Ésta parte de la curva de Bézier generalizada, presentada en la ecuación \ref{eq:Beziergen}.

\begin{subequations}

\begin{gather}

B\_{(t)}=\sum\_{i=0}^{n}\left(\stackrel{n}{i}\right)(1-t)^{n-i}t^{i}\*P\_{i}\label{eq:Beziergen}\\

B\_{(t)}=P\_{0}\cdot(1-t)^{3}+3\cdot P\_{1}\cdot(1-t)^{2}\cdot t^{1}+3\cdot P\_{2}\cdot(1-t)\cdot t^{2}+P\_{3}\cdot t^{3}\label{eq:Beziern3}

\end{gather}

\end{subequations}

Para la implementación de la curva, es imprescindible calcular los puntos de control ($P\_{0}, P\_{1}, P\_{2}$ y $P\_{3}$), referentes a las intersecciones en que se aplique. Para este punto es importante recordar las características de las curvas de Bézier presentadas al final del capítulo 3.\\

Basándose en ellas es importante decir que el primer y el último punto de control deben estar en la ruta, para asegurar que la generación de la curva parta de la ruta predefinida y llegue a ella al finalizar la generación. Además es importante definir los puntos intermedios ($P\_{1}, P\_{2}$) de tal manera que los vectores resultantes, esto es $\overline{P\_0P\_1}$ y $\overline{P\_2P\_3}$, estén en concordancia con la dirección de la ruta predefinida. Finalmente, tomando en cuenta que el comportamiento de la curva será acorde a la concavidad de los puntos de control, éstos deben ser colocados acorde al cruce gestionado.\\

En el presente trabajo, los puntos de control cumplen con lo anterior y son colocados sobre las líneas que conforman la intersección, asegurando la continuidad de la ruta y su dirección. Éstos son colocados simétricamente, $P\_{0}, P\_{3}$ y $P\_{1}, P\_{2}$, a 10m y 3m del punto de intersección respectivamente. En la Figura \ref{fig:Intersecciones} se presenta el trato a intersecciones.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.90]{Imagenes/Intersecciones}

\caption{Generación de trayectoria, utilizando curvas de Bézier, para intersecciones.}

\label{fig:Intersecciones}

\end{center}

\end{figure}

La generación matemática que asegura la posición de los puntos de control presentados en la Figura \ref{fig:Intersecciones}, se evidencia en la ecuación \ref{eq:puntosdecontrol}. Dicha ecuación describe la generación de estos puntos para intersecciones, y tiene su origen en la igualación del módulo unitario de los vectores $\overline{P\_{W2}P\_{W3}}$ y $\overline{P\_{W2}P\_{i}}$ descrito en la ecuación \ref{eq:modulos}. \\

\begin{equation}\label{eq:modulos}

\left\|\frac{P\_{W2}^{k}-P\_{W3}^{k}}{d2}\right\|=\left\|\frac{P\_{W2}^{k}-P\_{i}^{k}}{d1}\right\|

\end{equation}

\begin{subequations}\label{eq:puntosdecontrol}

\begin{gather}

P\_{0}^{k}=P\_{W2}^{k}+(P\_{W2}^{k}-P\_{W1}^{k})\cdot\frac{d1}{d2} \\

P\_{1}^{k}=P\_{W2}^{k}+(P\_{W2}^{k}-P\_{W1}^{k})\cdot\frac{d1}{d2} \\

P\_{2}^{k}=P\_{W2}^{k}+(P\_{W2}^{k}-P\_{W3}^{k})\cdot\frac{d1}{d2} \\

P\_{3}^{k}=P\_{W2}^{k}+(P\_{W2}^{k}-P\_{W3}^{k})\cdot\frac{d1}{d2}

\end{gather}

\end{subequations}

En las ecuaciones \ref{eq:modulos} y \ref{eq:puntosdecontrol}, el índice k representa la coordenada ($x,y$), \textit{d1} representa la distancia del punto intersección $P\_{W2}$ hasta el punto de control $P\_{i}$ y d2 representa la longitud del segmento donde se colocarán los puntos de control. Cada uno de los puntos está referenciado en la figura \ref{fig:Intersecciones}.\\

De esta manera, el generador dinámico de trayectoria puede gestionar la ruta en intersecciones. A pesar de que la herramienta utilizada para suavizar la ruta, sigue siendo la curva de Bézier, el problema de las redomas es tratado con una aproximación distinta, similar a trabajos anteriores \cite{Perez2013}.\\

Para el caso de las redomas, es importante recalcar su complejidad ya que no es un segmento recto, sino un segmento circular, el cual posee una curvatura asociada. La aproximación presentada en el trabajo de pasantía posee tres partes a saber, estas son: Entrada a la redoma, medio y salida de la redoma.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.50]{Imagenes/zoomredoma}

\caption{Generación de trayectoria, utilizando curvas de Bézier, para redomas.}

\label{fig:redoma}

\end{center}

\end{figure}

\noindent

1. \textbf{Entrada}\\

La entrada a la redoma se caracteriza por ser un segmento recto que se une a un segmento circular. La generación de la trayectoria por medio de curvas de Bézier es nuevamente implementada, de forma que la nueva aproximación recae sobre la posición de los puntos de control. \\

El primer punto de control ($P\_{0}$) será colocado a 10m del punto de intersección en el segmento recto, mientras que $P\_{1}$ será colocado justo en el punto de unión de los segmentos. Por otro lado, se calculará el punto $P\_{3}$, el cual estará a 10m del punto de unión, pero sobre la redoma, garantizando así que la nueva trayectoria tenga coherencia con la ruta generada en el planificador global. \\

Por su parte el punto $P\_{2}$ es el que rompe con el esquema, ya que éste tiene que ser colocado fuera de la ruta predefinida, produciendo un cambio de concavidad, evitando así el salto en la unión entre la curva de Bézier y el círculo de la redoma.\\

Utilizando a favor la tercera característica de las curvas de Bézier, el punto $P\_{2}$ es colocado a 6m del punto $P\_{3}$, sobre la recta tangente a la redoma en este último punto, como se evidencia en la Figura \ref{fig:redoma}. Esta posición de $P\_{2}$ iguala el ángulo de llegada de la curva con el ángulo de dirección del círculo en el punto $P\_{3}$, descartando así cruces bruscos en los puntos de intersección. Además, la posición del punto $P\_{2}$ asegura un cambio de concavidad, similar al del círculo en la redoma, generando así una entrada segura y suave.\\

\noindent

2. \textbf{Medio}\\

La generación de la trayectoria para el medio de la redoma será gestionada por las ecuaciones paramétricas del círculo. Éstas permiten generar una trayectoria circular entre un punto y otro dentro de la redoma, es decir, desde la entrada hasta la salida. Ellas se presentan en la ecuación \ref{eq:curvascirculo}, generando un punto cada 0.5m, como en \cite{Perez2011D}.\\

\noindent

3. \textbf{Salida}\\

La salida es manejada en forma simétrica a la entrada. La generación del punto $P\_{0}$ será a 10m del punto de unión de los segmentos, sobre la redoma. El punto $P\_{1}$ estará localizado a 6m de $P\_{0}$, sobre la recta tangente a la redoma en este punto, asegurando el cambio de concavidad y la suavidad en la unión de curvas. Por su parte, los puntos $P\_{2}$ y $P\_{3}$ estarán colocados en el punto de intersección, y a 10m de éste respectivamente. La Figura \ref{fig:redoma} muestra lo anteriormente explicado.\\

Por otro lado, la curvatura es uno de los parámetros de control considerados en la arquitectura, ésta es calculada dentro del planificador local una vez generados los tramos de suavizado de la vía. La curvatura es calculada a tiempo real a medida que los puntos de trayectoria son generados, y a su vez, se les asigna un perfil de velocidad según el tipo de segmento en el cual se encuentre el punto (Curvos o rectos).\\

El valor de la curvatura de un primer punto ``A'' en la trayectoria, es inversamente proporcional al radio del círculo definido por éste y los dos puntos siguientes a él (B y C). En la Figura \ref{fig:radio} se presenta la relación matemática gráfica que explica el cálculo de la curvatura en el presente trabajo\footnote{http://www.intmath.com/applications-differentiation/8-radius-curvature.php.}.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.70]{Imagenes/radio}

\caption{Cálculo del radio del círculo que pasa por tres puntos, su inverso es la curvatura}

\label{fig:radio}

\end{center}

\end{figure}

La operación para el cálculo de la curvatura queda definida en el algoritmo por las ecuaciónes \ref{eq:centro} y \ref{eq:curvatura}, donde el centro de dicho círculo será $(x\_d,y\_d)$, las pendientes de $\overline{AB}$ Y $\overline{BC}$ son $m\_1$ y $m\_2$ respectivamente, y los puntos A, B y C serán $(x\_a,y\_a)$, $(x\_b,y\_b)$ y $(x\_c,y\_c)$ respectivamente.

\begin{subequations}\label{eq:centro}

\begin{gather}

x\_d = \frac{m\_1m\_2(y\_a-y\_c) + m\_2(x\_a+x\_b)-m\_1(x\_b+x\_c)}{2(m\_2-m\_1)}\\

y\_d=-\frac{1}{m\_1}\left(x\_d-\frac{x\_a+x\_b}{2}\right)+\frac{y\_a+y\_b}{2}

\end{gather}

\end{subequations}

\begin{equation}\label{eq:curvatura}

Curvatura=\frac{1}{Radio}=\frac{1}{\sqrt{(x\_d-x\_c)^2+(y\_d-y\_c)^2}}

\end{equation}

%\subsubsection{Generador dinámico de trayectoria}

Al momento de añadir el perfil de velocidad, éste será diferenciado entre tramos rectos y tramos curvos. El tipo de tramo se define por la distancia entre el punto evaluado y el punto siguiente, de forma que sea la distancia la que dicte si es necesario un perfil de curvatura o no. En el trabajo de pasantías, se define como un tramo recto, todo aquel que tenga más de 2m de longitud entre los puntos que lo describen.\\

Uno de los parámetros de diseño que fue tomado en cuenta, es el límite de visión del vehículo. Éste es definido por el alcance de los sensores que el vehículo posea y es uno de los limitantes a la hora de reproducir la trayectoria dentro del módulo de planificación global.\\

El horizonte o límite de visión del \textit{Cybercar}, presentado en la Figura \ref{fig:Horizonte}, representa la distancia máxima permitida para la generación de la trayectoria a seguir. Es claro que en el presente trabajo sólo se profundiza en el área de planificación y control, pero la distancia máxima puede ser adquirida a través del módulo de fusión de data en la etapa de percepción con mapas SLAM, como en \cite{Resende2012}, y además puede considerar otros sensores, sin mencionar las comunicaciones V2V y V2I. Por ahora, es utilizado un límite de 20m delante del vehículo.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.70]{Imagenes/Horizonte}

\caption{El horizonte del vehículo determina la longitud de la trayectoria a calcular por el planificador global.}

\label{fig:Horizonte}

\end{center}

\end{figure}

Lo anterior nace del hecho que es necesario tener un comportamiento dinámico en la generación de la trayectoria, siendo importante únicamente definir la ruta hasta donde el vehículo tiene capacidad de modelar el entorno. Un ejemplo del procesamiento dinámico, es presentado en el trabajo de pasantías gracias a los cambios de canal dentro de las redomas.\\

El cambio de canal es realizado mediante la solicitud del operador, a través del módulo HMI, el cual informa al vehículo que debe realizar un cambio de canal, si es posible, dentro de la redoma. Esto puede estar motivado a que aparece algún obstáculo en la vía y es necesario permanecer en la redoma, en un canal distinto al actual. Una vez más las curvas de Bézier entran en acción, dotando al control de una trayectoria suave y segura al cambiar de canal.\\

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.70]{Imagenes/CambioDeCanal}

\caption{Los puntos previamente calculados son descartados y se genera una nueva trayectoria hacia el canal interior.}

\label{fig:CambioDeCanal}

\end{center}

\end{figure}

En la Figura \ref{fig:CambioDeCanal}, se presenta la generación de Bézier para cambios de canal en redomas. En ella se evidencia en amarillo la ruta previamente calculada, en azul la nueva ruta a seguir (cambiando de canal), donde ambas llegan hasta el horizonte de visibilidad del vehículo. Además se evidencia una de las características del planificador local: borra todos los puntos de trayectoria que ya han sido recorridos por el vehículo.\\

La trayectoria generada en éste módulo, luego de ser calculada hasta la distancia horizonte, será transmitida a la etapa de control a través de un \textit{buffer}. Esta herramienta permite enviar los puntos generados a tiempo real, lo cual es indispensable en este tipo de sistemas. El \textit{buffer} o cola, será un arreglo de memoria dinámico de tipo primero en entrar, primero en salir (FIFO, del inglés: First In First Out), entregando la información con el formato presentado a continuación:

\begin{enumerate}

\item Coordenada \textit{x}.

\item Coordenada \textit{y}.

\item Ángulo de dirección del segmento siguiente al punto.

\item Velocidad máxima asociada al segmento.

\item Tipo de punto:

\begin{itemize}

\item[$\circ$] Inicio de Trayectoria.

\item[$\circ$] Punto normal de trayectoria.

\item[$\circ$] Fin de trayectoria.

\item[$\circ$] Vaciar el \textit{buffer}

\end{itemize}

\end{enumerate}

El tipo ``vaciar el buffer’’ se envía únicamente cuando un cambio de trayectoria es requerido. Esto significa que si la trayectoria actual, calculada hasta el rango de visión del vehículo, no es adecuada, se vacía el arreglo de memoria que posee el \textit{buffer}, para ser reemplazado por la nueva trayectoria, como se muestra en la Figura \ref{fig:CambioDeCanal}.\\

Por último, en las Figuras \ref{fig:flujogramalocal} y \ref{fig:GenDin}, se presentan los flujogramas del planificador global y el generador dinámico de trayectoria respectivamente. Éstos explican su funcionamiento interno en cuanto a códificación.Las comunicaciones inter-módulo presentadas en los diagramas de flujo, se realizan a través de la plataforma RTMaps, la cual es descrita con detalle en el capítulo 5.

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.50]{Imagenes/FlujogramaLocal}

\caption{Flujograma del planificador local}

\label{fig:flujogramalocal}

\end{center}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\begin{center}

\includegraphics[scale=.50]{Imagenes/GeneradorDinamicoTrayectoria}

\caption{Flujograma del Generador dinámico de trayectoria}

\label{fig:GenDin}

\end{center}

\end{figure}

\subsection{Modo de manejo}

Hoy en día diferentes modos de manejo son presentados dependiendo del área donde el vehículo esté localizado. Algunas de las áreas comunes que se presentan en entornos urbanos son los estacionamientos, cruces de peatones, cruce escolar, intersecciones y redomas, donde cada una de ellas tiene una forma de manejo asociada. \\

Recientes aplicaciones hacen posibles distintos modos de manejo, como el control crucero adaptativo (ACC, del inglés: \textit{Adaptative Cruise Control}), adelantamientos, manejo en pelotón, paradas de emergencia, entre otros. En la arquitectura de control presentada, se toman en cuenta tres modos de manejo a saber: Manejo en segmentos rectos, intersecciones y redomas. Donde el manejo en redomas, y la generación de trayectoria con curvatura constante son algunas de las contribuciones más importantes.\\

\section{Control}\label{sec:control}

La etapa de control recibe la información proveniente de la etapa de decisión a través del planificador local, específicamente a través de un \textit{buffer}. Además recibe información importante del módulo de supervisión, de manera de poder seleccionar el modo de control deseado.\\

La implementación del \textit{buffer} es otro de los aportes de la presente arquitectura, puesto que en trabajos anteriores del equipo Imara, la planificación local de la ruta sólo permitía el paso de la información al controlador cada 1s, haciendo imposible el comportamiento a tiempo real.\\

\begin{figure}[!ht]

\centering

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

\subfloat[]{

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

\includegraphics[width=0.99\textwidth]{imagenes/buffera}}

\hspace{0.05\linewidth}

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

\subfloat[]{

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

\includegraphics[width=0.99\textwidth]{imagenes/bufferb}}%\\[10pt]

\hspace{0.05\linewidth}

%%----tercera subfigura----

\subfloat[]{

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

\includegraphics[width=0.99\textwidth]{imagenes/BufferCambio}}

%\hspace{0.1\linewidth}

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

%\subfloat[]{

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

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

\caption{\textit{Buffer} de trayectoria entre el planificador local y el controlador. En (a), la primera trayectoria en el instante $t$. En (b), la trayectoria en $t+t\_1$. En (c), la nueva trayectoria del cambio de canal en el instante $t+t\_1+t\_2$. }

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

\end{figure}

El \textit{buffer} o cola, es un arreglo de datos compartido a manera de puente entre el planificador local y el controlador. Por medio de él se puede asegurar una comunicación y comportamiento a tiempo real, permitiendo la gestión de distintos escenarios que afectan la conducción.\\

En las Figuras \ref{fig:buffera} y \ref{fig:bufferb}, se ve el comportamiento común del \textit{buffer} en situaciones de conducción predefinidas. Al momento de un evento imprevisto, el \textit{buffer} siempre puede ser borrado, para un recálculo de la trayectoria, como se muestra en la Figura \ref{fig:BufferCambio}, manteniendo así una trayectoria segura y suave. Cada uno de los puntos de trayectoria posee 6 parámetros asociados (coord. x, y, dirección, velocidad, curvatura, tipo de punto), excepto los dos últimos puntos en el planificador local, ya que la curvatura no ha sido calculada, por no poseer tres puntos para este fin. Lo que ocaciona que los puntos sin curvatura no serán transmitidos al controlador (luego no podrán ser modificados).\\

Una vez que la primera trama de trayectoria es enviada, se procede a calcular las variables de control que posteriormente serán enviadas a la etapa de actuación. Ellas son: el ángulo de dirección y la velocidad.\\

El módulo de control recibe mayor atención en cuanto al control lateral del vehículo en el presente trabajo. Sin embargo, fue necesaria la reprogramación del módulo completo por ser incompatible con el nuevo formato de trayectoria.\\

El error lateral, el error angular y la curvatura son las variables de control consideradas en la arquitectura para \textit{Cybercars}. Siendo la curvatura una de las mejoras en la arquitectura, ya que permite un mejor control dentro de segmentos curvos como las intersecciones y las redomas. Su implementación significa una adición a la información procesada por el controlador, presentando mejoras en el seguimiento de la trayectoria debido a que provee información sobre la ubicación de los siguientes puntos a recorrer.\\

En la ecuación de control utilizada se presenta como la ecuación \ref{eq:controllateral}, donde $K\_1$, $k\_2$ y $k\_3$ son las ganancias del controlador para la curvatura, el error lateral y el error angular, respectivamente. En la Figura \ref{fig:}, un ejemplo del cálculo de las variables de control es presentado.

\begin{equation}

U\_{(t)} = K\_{1}\*Curvatura + K\_{2}\*Error\\_lateral + K\_{3}\*Error\\_angular \label{eq:controllateral}

\end{equation}

El cálculo de la curvatura se explica en el módulo de planificación local, sin embargo es importante describir las otras dos variables de control presentadas en la Figura \ref{fig:} y en la ecuación \ref{eq:controllateral}.\\

\textbf{Error lateral}\\

El error lateral es calculado con respecto al punto de control adelantado (del inglés: \textit{Lookahead}). Éste punto será implementado de la misma manera que ha sido utilizado en trabajos anteriores \cite{TesisPerez2012}, donde se coloca en la parte delantera del vehículo. En la Figura \ref{fig:} se presenta el cálculo del error lateral como la medida de la distancia en metros, desde el segmento actual de la ruta hasta el punto de control adelantado.\\

\textbf{Error angular}\\

El error angular representa la diferencia entre el ángulo de dirección del vehículo y el ángulo de la recta tangente al segmento de trayectoria actual. Es medido en ángulos $\in [-\pi,\pi]$, tal como se muestra en la Figura \ref{fig:}.\\

Por otro lado, el control longitudinal se basa en una serie de rampas simples de velocidad, implementadas con ecuaciones básicas de cinemática. Éstas obtienen su referencia de control de la trayectoria proveniente del planificador local, gracias al parámetro \textit{speed} o velocidad. Además de esto, el control longitudinal se ve apoyado por el controlador proporcional-integral-derivativo (PID, del inglés: Proportional-Integral-Derivative controller), propio del bajo nivel de control del \textit{Cybercar}, tanto en plataformas reales como en simulaciones.\\

Al iniciar el recorrido, el controlador implementará la ecuación \ref{eq:controllongi1}, la cual generará una rampa de velocidad hasta llegar a la velocidad máxima del segmento. Esto genera suavidad en el control longitudinal, logrando el confort deseado en el arranque. Esta misma ecuación será utilizada en caso que exista un aumento en el límite de velocidad, bien porque un nuevo segmento de distinto límite es alcanzado o bien porque el operador ha aumentado la velocidad máxima (siempre limitada por la velocidad máxima reglamentaria de la vía).

\begin{equation}

V\_{(t)} = V\_{o} + at \label{eq:controllongi1}

\end{equation}

En la ecuación \ref{eq:controllongi1}, $V\_{(t)}$ será la nueva velocidad, $V\_{o}$ es la velocidad actual del vehículo, $a$ es la aceleración máxima de la rampa de velocidad impuesta por el operador, y $t$ es el tiempo transcurrido.\\

Para disminuir la velocidad se presenta la ecuación \ref{eq:controllongi2}. Ésta parte de la ecuación \ref{eq:controllongi2origen} y permite al vehículo realizar una disminución constante de su velocidad. Esto aumenta la seguridad al momento de frenar, bien porque sea necesario disminuir la velocidad debido a paradas de emergencia, cambios en el perfil de velocidad o por la llegada a destino. Donde cada una de las situaciones anteriores tiene una aceleración asociada, la cual puede ser impuesta por el operador.

\begin{equation}

V\_{(t)}^2 = V\_{o}^2 + 2ad \label{eq:controllongi2origen}

\end{equation}

\begin{equation}

V\_{(t)} = \sqrt{2ad} \label{eq:controllongi2}

\end{equation}

En las ecuaciones \ref{eq:controllongi2origen} y \ref{eq:controllongi2}, $V\_{(t)}$ será la nueva velocidad, $V\_{o}$ es cero ya que queremos detener el vehículo, $a$ es la desaceleración máxima de la rampa de velocidad impuesta por el operador, y $d$ es la distancia al punto destino o de parada. Es importante mencionar que sólo se toma la parte positiva de la raíz cuadrada ya que el vehículo posee siempre velocidad positiva (va hacia adelante).\\

En \cite{Labakhua2008} se presenta la relación incomodidad-aceleración cuando una persona es sometida a aceleraciones. Dicha relación es referida de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, del inglés: International Organization for Standardization), y permite tener una idea de la aceleración media agradable para la elección del operador.\\

\section{Actuación}\label{sec:actuacion}

La etapa de Actuación recibe la información desde la etapa de control. Su tarea consiste en mover el actuador del CTS, es decir, el volante y los pedales. Tanto en las plataformas reales como en las simuladas, el vehículo posee una acción de control definida y normalizada entre [-0.5, 0.5], derecha e izquierda respectivamente para la dirección de las ruedas. Los mismos valores son aplicados respectivamente, para el freno y el acelerador.\\

La etapa de actuación también aporta y recibe información del can de bajo nivel que fue explicado en la etapa de adquisición. Por su parte los actuadores en el simulador se traducen en par para las ruedas del \textit{Cybercar} virtual y ángulos para la dirección de las ruedas.

\section{Extras}

Los módulos extras son tres a saber: La base de datos, la interfaz humano máquina y la supervisión.\\

La base de datos guarda la data fija referente al camino a recorrer, como mapas, dimensiones del camino, límite de velocidad, etc. Ella puede ser accesada en cualquier momento si alguna información de éste tipo es requerida por los planificadores.\\

La HMI permite al operador definir los parámetros de viaje. Dentro de estos parámetros está el destino, las posibles rutas para llegar a él, cambios de canal, velocidad deseada, entre otros.\\

Por otro lado, el módulo de supervisión se encarga de monitorear cualquier colisión inminente. Siempre está evaluando la situación actual del vehículo para determinar si debe tomar el control y llevar a este a una parada de emergencia.

\section{Resumen}

En el capítulo 4, una nueva y evolucionada arquitectura de control para CTS fue presentada. Siendo la modularidad del sistema su mayor característica de diseño. En ella, el mayor aporte es el generador dinámico de trayectoria, el cual puede manejar situaciones imprevistas en la conducción, además de dos problemas comunes dentro de los entornos urbanos: Intersecciones y redomas.\\

La nueva arquitectura de control parte de trabajos previos en el equipo Imara \cite{Resende2012,bouraoui2011}, los cuales presentan la necesidad de una nueva aproximación para poder evolucionar y manejar una mayor cantidad de situaciones.\\

Finalmente, la arquitectura presenta mayor libertad en el procesamiento del mapa para la generación de la trayectorias, con especial atención en las etapas de decisión y control, dando seguridad y suavidad en la trayectoria generada.