

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA UN VEHÍCULO MOVIL

por

Sofía Valentina Machín

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Mayo 2017

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA UN VEHÍCULO MOVIL

por

Sofía Valentina Machín Silva
Ingeniera Industrial Mecánica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo A. Perondi

Co-Orientador: Prof. Dr. Rafael A. C. Laranja

Aprovada por:

Prof. Dr. Tiago Becker.....DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara.....DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini.....PROMECC/UFRGS

Prof. Dr. Jackson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30, Mayo 2017.

El mejor tiempo para comienzos siempre es ahora.

AGRADECIMENTOS

En primer orden, gracias a mis tutores, Eduardo Perondi y Rafael Laranja por la infinita paciencia, la dedicación y el claro criterio para orientarme durante el desarrollo de este trabajo. Así como la amabilidad de ellos y sus colegas para cada vez que visité Porto Alegre.

Gracias a mis compañeros del Departamento de Diseño Mecánico del IIMPI por cubrirme las horas y las responsabilidades mientras escribía este trabajo y darme siempre apoyo para seguir. Gracias al IIMPI por permitirme viajar siempre que fuere necesario, darme la oportunidad de participar en esta maestría y confiar en mí.

Gracias a Francisco Puignau por abrirme la puerta a su tema de tesis, apostar a desarrollarla en conjunto y ser de apoyo durante todo este periplo que termina cual pacto de caballeros. Gracias a Diego Maiuri por escucharme cada vez que me trancaba con esto y no dejarme abandonar nunca.

Muchas gracias a mi madre y mi abuela, que siempre buscan mi progreso y me apoyan en cada proyecto. Gracias a mi padre y mis hermanos, que me empujan a que siempre suba otro escalón. Gracias Adrian por soportarme, no es fácil aguantar esta cabeza y mientras yo dedicaba horas en esto, apostar a un proyecto aun mas grande conmigo.

Gracias a los amigos a los que he robado horas de compañía por terminar esto. Ellos saben que siempre están presentes aunque no nos veamos. Gracias al resto de mis compañeros de trabajo y personas que me rodean a diario que durante un año me escucharon hablar de este trabajo infinidad de veces.

RESUMEN

El siguiente trabajo busca desarrollar y testear un controlador para un robot móvil con fines agrícolas. Enmarcado en un proyecto más grande, que actualmente desarrolla un prototipo de robot móvil con desplazamiento autónomo para colaborar en las tareas agropecuarias, este trabajo parte de las ecuaciones cinemáticas desarrolladas para este prototipo y desarrolla una estrategia de control mediante torque computado para el desplazamiento autónomo del vehículo en el medio y se realizan simulaciones de las mismas. Realizado este trabajo y obteniendo resultados certeros se deja todo pronto para continuar con la instancia experimental en el prototipo.

Palabras clave: Robot Móvil, Torque Computado, Desplazamiento Autónomo.

ABSTRACT

The following dissertation tries to develop and test a mobile robot controller for agricultural purposes. Framed in a bigger project that is currently developing a mobile robot prototype with autonomous movement to help with agricultural work, this work starts in the kinematic equations developed for the prototype and develops a control strategy through computed torque control for the autonomous movement of the vehicle and simulations are performed of such computation. With this work finished and with the results obtained is ready to continue with the experimental instance in the prototype.

Key words: Mobile robot, Computed torque control, Autonomous movement.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS | 3 |
| 1.2 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO | 3 |
| 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA | 5 |
| 2.1.1 Trayectorias para control..... | 7 |
| 2.1.2 Modelo dinámico | 9 |
| 2.1.3 Control por Torque Computado | 10 |
| 2.1.4 Equilibrio de fuerzas vehicular..... | 14 |
| 2.1.5 Dinámica de las articulaciones..... | 16 |
| 2.1.6 Método de Lyapunov | 18 |
| 2.2 APLICACIONES DE ROBÓTICA MOVIL..... | 23 |
| 3 MODELO Y DISEÑO VEHICULAR | 25 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO..... | 25 |
| 3.2 MODELO MATEMÁTICO..... | 29 |
| 4 CONTROLADOR | 32 |
| 4.1 CONTROL DEL BRAZO BIARTICULADO..... | 33 |
| 4.2 CONTROL DEL VEHÍCULO MOVIL..... | 37 |
| 4.2.1 Determinación de las ganancias K_v y K_p | 38 |
| 4.2.2 Simulación al sistema inicial | 42 |
| 4.2.3 Determinación de la ley de fricción en la articulación..... | 53 |
| 4.2.4 Simulación al sistema considerando fricción del motor | 54 |
| 5 CONCLUSIONES | 62 |
| 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1 | Prototipo actual..... | 2 |
| Figura 2.1 | Esquema de robot SCARA..... | 6 |
| Figura 2.2 | Componentes del sistema de un robot..... | 6 |
| Figura 2.3 | Control genérico en espacio de junta..... | 8 |
| Figura 2.4 | Control genérico en espacio operacional..... | 8 |
| Figura 2.5 | Diagrama Control por Torque Computado..... | 11 |
| Figura 2.6 | DCL para un vehículo estándar a tracción..... | 15 |
| Figura 2.7 | Geometría vehicular..... | 16 |
| Figura 3.1 | Módulos articulados centralmente en vista superior y lateral..... | 25 |
| Figura 3.2 | Articulación central del vehículo..... | 26 |
| Figura 3.3 | Detalle de articulación central del vehículo..... | 27 |
| Figura 3.4 | Rueda con motor..... | 28 |
| Figura 3.5 | Controladora de potencia..... | 28 |
| Figura 3.6 | Esquema plataforma móvil..... | 30 |
| Figura 4.1 | Esquema del brazo robótico..... | 34 |
| Figura 4.2 | Diagrama de Control por Torque Computado..... | 35 |
| Figura 4.3 | Gráfico de error de seguimiento para eslabón 1..... | 36 |
| Figura 4.4 | Gráfico de error de seguimiento para eslabón 2..... | 37 |
| Figura 4.5 | Representación de torques y fuerzas sobre la plataforma móvil..... | 39 |
| Figura 4.6 | Representación de distancias en la plataforma móvil..... | 40 |
| Figura 4.7 | Diagrama de control por Torque Computado..... | 44 |
| Figura 4.8 | Error de seguimiento para módulo 1 caso 1..... | 45 |
| Figura 4.9 | Error de seguimiento para módulo 1 caso 2..... | 45 |
| Figura 4.10 | Error de seguimiento para módulo 1 caso 3..... | 46 |
| Figura 4.11 | Error de seguimiento para módulo 2 caso 1..... | 47 |
| Figura 4.12 | Error de seguimiento para módulo 2 caso 2..... | 47 |
| Figura 4.13 | Error de seguimiento para módulo 2 caso 3..... | 48 |
| Figura 4.14 | Torque necesario en módulo 1 caso 1..... | 49 |
| Figura 4.15 | Torque necesario en módulo 1 caso 2..... | 49 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 4.16 | Torque necesario en módulo 1 caso 3..... | 50 |
| Figura 4.17 | Torque necesario en módulo 2 caso 1..... | 51 |
| Figura 4.18 | Torque necesario en módulo 2 caso 2..... | 51 |
| Figura 4.19 | Torque necesario en módulo 2 caso 3..... | 52 |
| Figura 4.20 | Diagrama de control por Torque Computado..... | 55 |
| Figura 4.21 | Error de seguimiento para módulo 1 caso 4..... | 56 |
| Figura 4.22 | Error de seguimiento para módulo 2 caso 4..... | 57 |
| Figura 4.23 | Torque necesario en módulo 1 caso 4..... | 57 |
| Figura 4.24 | Torque necesario en módulo 2 caso 4..... | 58 |
| Figura 4.25 | Error de seguimiento para módulo 1 caso 5..... | 59 |
| Figura 4.26 | Error de seguimiento para módulo 2 caso 5..... | 59 |
| Figura 4.27 | Torque necesario en módulo 1 caso 5..... | 60 |
| Figura 4.28 | Torque necesario en módulo 2 caso 5..... | 60 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 2.1 | VARIABLES DE CONTROL..... | 7 |
| Tabla 3.1 | VARIABLES DEL ECUACIONAMIENTO CINEMÁTICO..... | 30 |
| Tabla 4.1 | DIFERENTES COEFICIENTES DE FRICCIÓN PARA NEUMÁTICOS..... | 41 |
| Tabla 4.2 | RESULTADOS SIMULACIONES CASO 1, CASO 2 Y CASO 3..... | 53 |
| Tabla 4.3 | RESULTADOS SIMULACIONES CASO 4 Y CASO 5..... | 61 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| PROMEC | Programa de Pos-Graduación en Ingeniería Mecánica |
| UFRGS | Universidad Federal de Rio Grande del Sur |
| FING | Facultad de Ingeniería |
| INIA | Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria |
| SCARA | Selective Compliant Articulated Robot Arm |
| PID | Controlador Proporcional Integrador Derivativo |
| PCB | Printed Circuit Board |
| PD | Controlador Proporcional Derivativo |
| DCL | Diagrama de Cuerpo Libre |
| CC | Corriente Continua |
| GPS | Global Positioning System |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|---|
| x | Posición en espacio cartesiano [m]o[rad] |
| \dot{x} | Velocidad en espacio cartesiano [m/s]o[rad/s] |
| x_d | Posición final deseada en el espacio cartesiano [m]o[rad] |
| q_d | Posición deseada en el espacio de juntas [rad] |
| q | Posición en espacio de juntas [rad] |
| \dot{q} | Velocidad en las juntas [rad/s] |
| \dot{q}_d | Velocidad deseada en las juntas [rad/s] |
| \ddot{q}_d | Aceleración deseada en las juntas [rad/s^2] |
| τ | Torque aplicado a las juntas [Nm] |
| $H(q)$ | Matriz de inercia dependiente de la posición articular [Kgm^2] |
| $C(q, \dot{q})$ | Matriz de fuerzas de Coriolis y Centrífugas [Kgm^2/s] |
| K_v | Constante de ganancia para velocidad [$1/s$] |
| K_p | Constante de ganancia para posición [$1/s^2$] |
| e_q | Error de seguimiento [rad] |
| \dot{e}_q | Error de velocidad [rad/s] |
| \ddot{e}_q | Error de aceleración [rad/s^2] |
| τ_g | Torque de las fuerzas gravitatorias [Nm] |
| g | Aceleración gravitatoria [m/s^2] |
| ζ | Factor de amortiguamiento |
| ω_n | Frecuencia natural [Hz] |
| k | Rigidez de junta [N/m] |
| J | Matriz de inercia para una junta. [Kgm^2] |
| ω | Frecuencia [Hz] |
| F_x | Fuerza neta en la dirección de avance del vehículo [N] |
| μ | Coefficiente de fricción entre superficies |
| W | Carga del vehículo [N] |
| h | Altura del centro de masa del vehículo [m] |
| b | Distancia horizontal del centro de masa al apoyo de rueda en vehículo [m] |

| | |
|--------------|--|
| L | Distancia horizontal entre las ruedas del vehículo [m] |
| a | Ancho del vehículo [m] |
| f_1 | Coefficiente de fricción viscosa $Kg \text{ rad}/s$ |
| f_2 | Coefficiente de fricción de Coulomb $Kg \text{ rad}^2/s$ |
| $\dot{\phi}$ | Velocidad de giro de motor eléctrico o junta [rad/s] o [rpm] |
| $V(t, x)$ | Función de Lyapunov en función de la posición y tiempo |
| θ_1 | Posición del módulo uno del vehículo móvil [rad] |
| θ_2 | Posición del módulo dos del vehículo móvil [rad] |
| I_1 | Inercia del módulo uno [Kgm^2] |
| I_2 | Inercia del módulo dos [Kgm^2] |
| τ_1 | Torque aplicado al módulo uno [Nm] |
| τ_2 | Torque aplicado al módulo dos [Nm] |
| m_1 | Masa del módulo uno [Kg] |
| m_2 | Masa del módulo dos [Kg] |
| L_1 | Largo tráiler uno [m] |
| L_2 | Largo tráiler dos [m] |
| $F_{1,1}$ | Fuerza resultante en el módulo uno la rueda uno [N] |
| $F_{1,2}$ | Fuerza resultante en el módulo uno la rueda dos [N] |
| $F_{2,1}$ | Fuerza resultante en el módulo dos la rueda uno [N] |
| $F_{2,2}$ | Fuerza resultante en el módulo dos la rueda dos [N] |
| I | Matriz de identidad |
| δ | Parámetro auxiliar en demostraciones |
| ϵ | Error dinámico |

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mano de obra calificada para las actividades relacionadas con la cosecha y el manejo de ésta es un recurso crítico. Por otro lado, la maquinaria local tiene como base un tractor (plataforma móvil) a la cual se le acoplan distintas herramientas, adecuadas a la tarea que se debe realizar. Este tipo de maquinaria depende, al menos, de un operador humano encargado de controlar la movilidad del tractor y el movimiento de la herramienta. La necesidad de un operador humano tiene principalmente los siguientes inconvenientes: limita la cantidad de herramientas o tareas que pueden realizarse simultáneamente, genera fatiga cognitiva en el operador humano, condiciona las características de la plataforma móvil, e impone limitaciones en cuanto a las horas del día aprovechables [Tejera, 2014].

Estos aspectos conducen a reflexionar sobre la factibilidad de introducir tecnología robótica autónoma en el agro, como forma de mitigar el problema de la falta de mano de obra calificada y, concomitantemente, lograr una mejor solución que tome en cuenta aspectos como ser: uso de combustible, cubrimiento del área geográfica, tiempo invertido, plazos e indicadores de calidad del trabajo ejecutado.

De lo descrito anteriormente surge el marco del proyecto llevado adelante por la Facultad de Ingeniería (FING) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Como objetivo general de ese proyecto se plantea el desarrollo de prototipos dotados de algún grado de autonomía, adaptados a la realidad nacional, esto es, teniendo en cuenta su construcción en el mercado local por empresas nacionales y las características actuales de las plantaciones de frutales y proyección en el mediano plazo.

Así surge la idea por parte de la FING de la construcción de una plataforma vehicular autónoma, que suplante la chata que emplea el tractor y permita transportar cosechas de manzana de manera independiente de operadores por el campo de plantación. En el diseño de este vehículo se enmarca este trabajo, y el aspectos que se tendrán en cuenta para su desarrollo es su sistema de control.

En el prototipo mostrado en la Figura 1.1 es en el que actualmente se encuentra el proyecto trabajando. El presente trabajo busca desarrollar una estrategia de control para el mismo que se enmarque dentro de los objetivos generales del proyecto y permita cumplir con los mismos. Para lograr y optimizar el trabajo, se busca partir de desarrollos ya ampliamente conocidos y adaptarlos a este modelo, en este caso, por similitudes más adelante vistas, se trabajará con robots del tipo brazo biarticulado, un ejemplo de este caso son los primeros grados de libertad de un robot SCARA. Este último robot es un robot de cuatro grados de libertad con posicionamiento horizontal, conocido por sus rápidos ciclos de trabajo, excelente repetitividad y su amplio campo de aplicación.

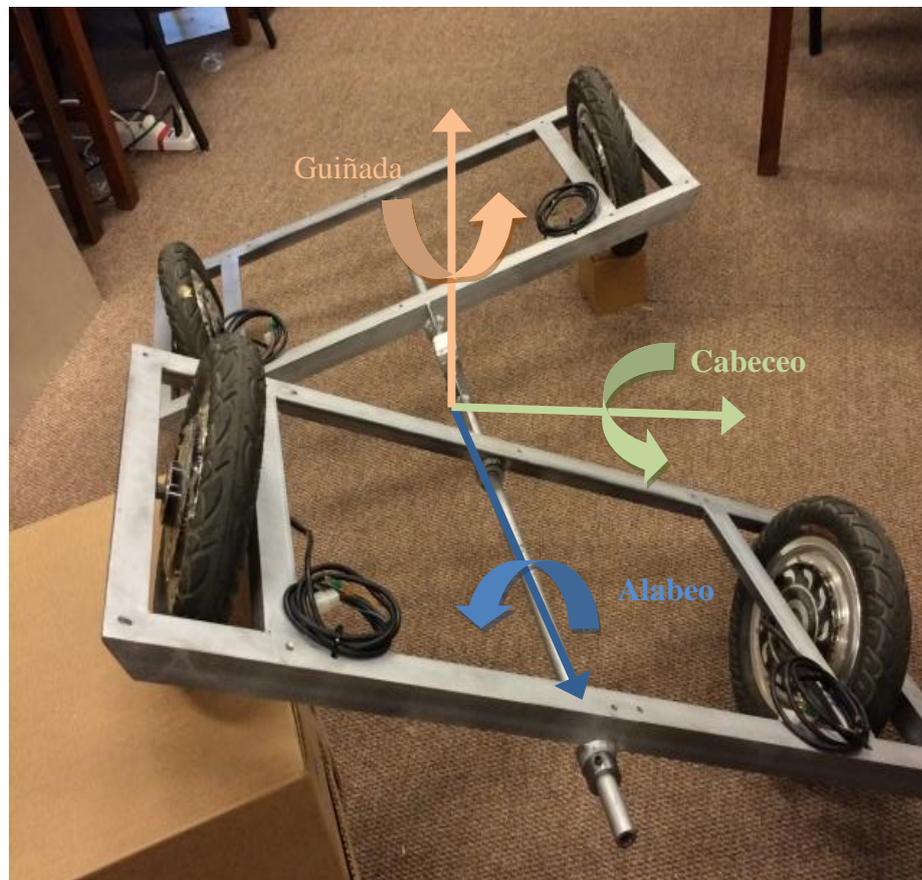


Figura 1.1 – Prototipo actual.

1.1 OBJETIVOS

A través de este trabajo, se busca colaborar en el diseño del sistema de control del prototipo que le brinde al mismo cierto grado de autonomía para que logre llevar adelante principalmente el traslado de la fruta desde el pie del árbol en que el operario la cosecha, hasta el bin u otro envase de acopio junto al tractor.

Planteadas las ecuaciones cinemáticas que gobiernan el modelo del vehículo móvil en el trabajo de Puignau, 2017, se procederá a diseñar la estrategia de control. Para ello se decide mantener el desarrollo realizado y reconociendo las similitudes del modelo con un brazo robot biarticulado, se observaran estrategias desarrolladas y validadas para este caso y se extrapolaran al siguiente trabajo. Esto implica decidir utilizar Control por Torque Computado como estrategia de control y así favorecer la solución de las no linealidades del sistema.

Para los objetivos mencionados anteriormente se utilizará la herramienta SIMULINK, software de programación visual que permitirá desarrollar las simulaciones para validar los resultados, obtener gráficos para su estudio y desarrollar las conclusiones del trabajo.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El siguiente trabajo continúa con la revisión bibliográfica, capítulo donde se encuentra la fundamentación teórica que acompaña los desarrollos de este material y el estado del arte, donde se discute los trabajos actuales más relevantes encontrados en esta área. En ambas etapas se destaca el desarrollo y constante mención de robots biarticulados, lo que nos permite tener una extensa cantidad de material e investigaciones como punto de partida que podrá ser utilizado, una vez demostrado en el Capítulo 3 las similitudes del prototipo con el mencionado Robot.

No obstante esto, también se analizará el desarrollo de plataformas para sistemas agrícolas, así como aspectos de la dinámica móvil vehicular para complementar el desarrollo particular de este prototipo.

El Capítulo 3 presentará además de lo mencionado, un resumen detallado del vehículo con datos del mismo y el modelo cinemático para luego en el Capítulo 4 desarrollar

propriadamente el controlador con su ecuacionamiento específico, objetivo de este trabajo. Ya se presentarán las simulaciones con gráficos obtenidos de las mismas que permitirán llegar a las conclusiones de este trabajo.

El cierre del trabajo viene dado en el capítulo 5 con las Conclusiones del mismo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Según Siciliano et al, 2009, la robótica se encarga del estudio de máquinas que pueden remplazar a humanos en la ejecución de tareas. En esta simple definición es que se basa el desarrollo de este prototipo y se comienza por lo tanto con el estudio de la robótica.

Los robots pueden sufrir diversas clasificaciones, una de las más utilizadas es entre robot manipulador y robot móvil según Stadler, 1995. Para los robots manipuladores el movimiento se ve limitado por el trabajo de juntas, enlaces y la presencia de un punto fijo "base" para el desarrollo del modelo cinemático del robot. En el caso de robots móviles, es la ausencia de este punto fijo lo que los caracteriza, son robots que se pueden mover libremente en el ambiente donde se ubican. En el caso de robots móviles se encuentra el robot de este trabajo, el cual además de ser un caso móvil, se trata de un robot con ruedas donde estas permiten el traslado del mismo en su ambiente de trabajo. Obstante esto, se desarrollara conceptos de robots manipuladores que por ser los más conocidos y desarrollados, estos conceptos a pesar de su naturaleza, se utilizaran en relación con este trabajo como se indicará mas adelante.

Dentro de los robots manipuladores se encuentran diversos tipos, clasificados o reconocidos según las capacidades de movimiento que les permiten sus juntas. Uno de los más conocidos en este grupo es el robot SCARA, este robot como se puede ver en la Figura 2.1, presenta uno de sus movimientos alrededor del plano horizontal conjunto a una traslación paralela de estos planos.

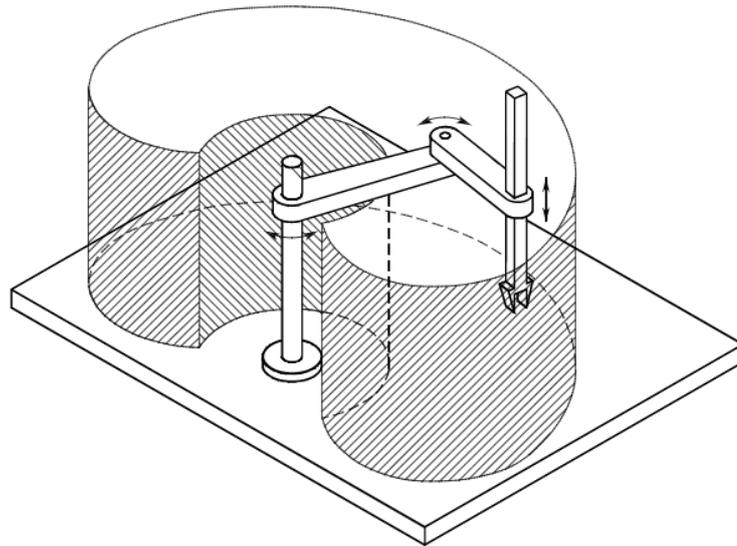


Figura 2.1 – Esquema de robot SCARA.
(Fuente: Siciliano et al, 2009.)

Este robot es un caso particular de brazo biarticulado como se puede observar en la Figura 2.1, esto según los movimientos que se permite en torno al giro en dos ejes paralelos. Esta característica es la más destacable, que permitirá relacionarlo con el robot móvil en un apartado más adelante en este trabajo.

La operativa de un robot se representa en la Figura 2.2, donde se puede identificar al control como una pieza o parte fundamental para articular este sistema y dar correcto funcionamiento.

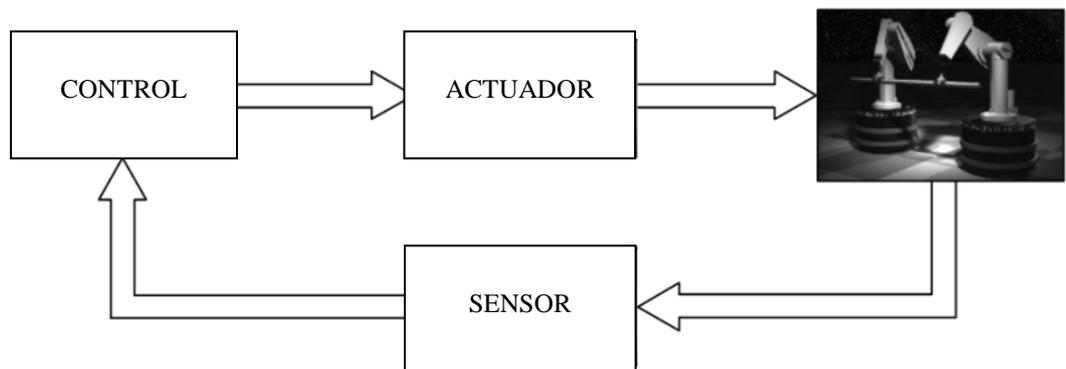


Figura 2.2 – Componentes del sistema de un robot.
(Fuente: Siciliano et al, 2009.)

Como presenta Siciliano et al, 2009, este diagrama de operación de un robot es la base del trabajo, dado que el objetivo es controlar el movimiento y este debe ser censado, procesado y controlado en tiempo real. Por lo cual, la estrategia de control debe ser simple para contribuir en el sistema.

Para avanzar camino al desarrollo de la estrategia de control, se debe realizar el planeamiento de trayectoria que consiste en tomar la trayectoria deseada para luego tomar los puntos por los cuales pasara el robot. Conocido esto, se debe formular el control que determine las fuerzas o pares a entregar al robot a modo de garantizar la ejecución de los requisitos de traslado deseado.

2.1.1 Trayectorias para control

Las trayectorias pueden estar identificadas en el espacio físico tridimensional donde se mueve el robot, pero el sistema de control puede estar orientado en variables de este estilo o en las variables internas de posición de las juntas y enlaces del robot. Esto abre dos caminos, el control en espacio de junta y el espacio operacional según Siciliano et al, 2008.

Para abordar el análisis de estos dos posibles sistemas de control conviene definir las variables que se mencionan anteriormente con su nomenclatura habitual en el área objeto de estudio de este trabajo y que serán utilizadas a lo largo del mismo. Se presenta la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 - Variables de control.

| Variable | Descripción |
|-----------------|---|
| x_d | Desplazamiento o posición final deseada en el espacio cartesiano. |
| q_d | Desplazamiento o posición deseada en el espacio de juntas |
| τ | Torque aplicado a las juntas |
| q | Posición obtenida por robot en espacio de juntas |
| x | Posición obtenida por robot en espacio cartesiano. |

La Tabla 2.1 presenta como variables deseadas aquellas que tienen el subíndice “d”, mientras que las variables que se consideran ciertas no presentan este mismo subíndice pero si mantienen la misma letra cardinal. Esta aclaración será válida para cualquier otra variable presente en el texto.

Para el caso de la Figura 2.3, se presenta el estado de control en el espacio de junta, o sea utilizando variables internas de las posiciones de los enlaces del robot. Esto permite un seguimiento directo, ya que partiendo de variables de junta es directo conocer los torques necesarios para que las mismas alcancen esas posiciones deseadas, reduciendo tiempo en el procesamiento. Sin embargo, la especificación del movimiento nunca está dada en este espacio y se debe convertir al espacio de junta mediante el uso de la cinemática inversa. Este esquema es útil de implementar para tareas de robótica donde sea importante la precisión espacial.

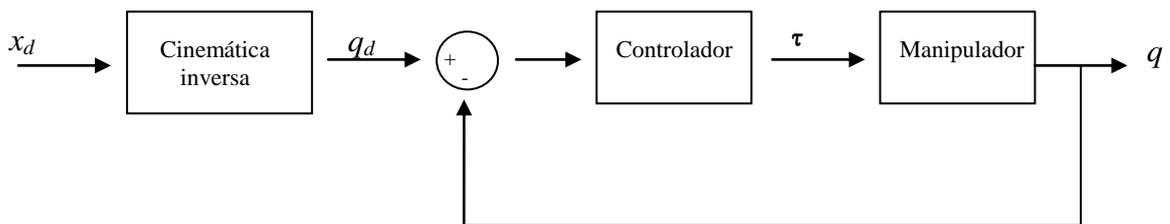


Figura 2.3 - Control genérico en espacio de junta.

(Fuente: adaptado de Siciliano et al, 2008.)

En casos de control más complicados, donde la trayectoria puede que sea modificada inesperadamente o se deba responder a entradas de sensor es donde entra el control en espacio operacional presentado en la Figura 2.4. Para este caso, se tiene la ventaja de trabajar en el espacio donde se verán los resultados finales y se obtiene un control más certero del movimiento del robot relacionado con el ambiente de trabajo del mismo.

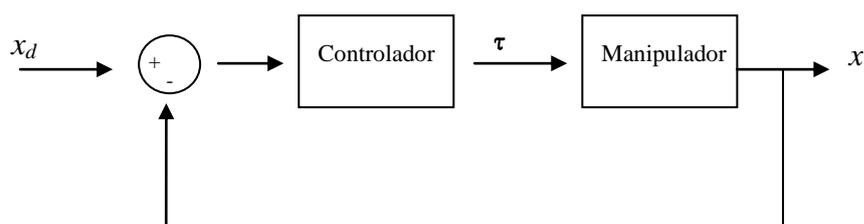


Figura 2.4 - Control genérico en espacio operacional.

(Fuente: adaptado de Siciliano et al, 2008.)

El sistema de control presentado en la Figura 2.4, aplicado para el control de movimiento de manipuladores, tiene como complejo la dinámica incierta que presentan, la forma de sus resultados no lineales y el acoplamiento del robot. A esto se suma en parte el desconocimiento de las variables dinámicas. Por otra parte Siegwart y Norubakhsh, 2004, ya presentan que para el caso de la robótica móvil es este último caso el sistema de control utilizado en caso de vehículos móviles por lo cual será el desarrollado en este trabajo.

2.1.2 Modelo dinámico

El modelo dinámico para un robot manipulador de n juntas puede ser descrito por la Ecuación (2.1).

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_g(q) = \tau \quad (2.1)$$

donde: q se corresponde con un vector ($n \times 1$) que tiene la posición de cada una de estas juntas según Tabla 2.1, $H(q)$ es la matriz de inercia del sistema ($n \times n$), $C(q, \dot{q})$ es un vector ($n \times 1$) que representa las fuerzas de Coriolis y centrífugas las cuales dependen de la posición y velocidad, $\tau_g(q)$ es el torque de las fuerzas gravitatorias representado por un vector ($n \times 1$) y por último, τ el torque que entregado a cada junta, vector ($n \times 1$) según Tabla 2.1.

En principio para la Ecuación (2.1) se mantiene al margen la fricción y perturbaciones, [Siciliano et al, 2008].

Dado que el objetivo es desplazar el robot siguiendo una trayectoria, se podría tomar varios puntos de esta trayectoria, asignarlos como puntos de consigna u objetivo y asignar estrategias de control simples ya conocidas.

Según Kuo, 1996, la estrategia de control por Controlador Proporcional Integrador Derivativo (PID) es adecuada en la mayoría de los casos en los que se tienen los valores consigna, pero en la robótica, este no es la solución más adecuada a los problemas de control. Los sistemas de control en robótica no solo deben llegar a estos puntos, sino requieren de capacidades de seguimiento de trayectoria eficaces, controlar otros parámetros como

velocidades y aceleraciones del prototipo. En ese caso, si se siguiera en la idea de utilizar un PID, se requiere un alto número de puntos de ajuste intermedios, con lo que retrasa mucho la finalización de la tarea y la eficiencia computacional. A su vez, para mejorar el rendimiento de seguimiento de trayectoria, los controladores deben tener en cuenta el modelo dinámico del manipulador (Ecuación 2.1) y por ello se descarta control por PID y entra en juego el Control por Torque Computado.

2.1.3 Control por Torque Computado

Para el control de robots, uno de los controladores más utilizados actualmente, es el Control por Torque Computado. Esta técnica aplica la teoría de retroalimentación para la linealización de sistemas no lineales y su punto de partida es la cancelación de los términos no lineales y desacoplamiento de la dinámica de cada enlace. Consiste en un lazo de retroalimentación interno no lineal y un lazo externo con una señal de control exógena.

Basados en Kelly et al, 2005, se desarrollan el ecuacionamiento del controlador. La ley de control para el caso de Control por Torque Computados viene dada por:

$$\tau = H(q)v + C(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_g(q) \quad (2.2)$$

Con la elección de v para esta estrategia de control:

$$v = \ddot{q}_d + K_v(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_p(q_d - q) \quad (2.3)$$

donde para la Ecuación (2.3) K_v y K_p son matrices ($n \times n$) diagonales positivas definidas siempre que se trate de un robot de n juntas y el resto de los parámetros de las ecuaciones (2.2) y (2.3) son los mismos presentados en la Ecuación (2.1), recordando siempre el detalle de la expresión del subíndice “d” para aquellas variables deseadas del Robot.

Es habitual denominar:

$$e_q = (q_d - q) \quad (2.4)$$

$$\dot{e}_q = (\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (2.5)$$

$$\ddot{e}_q = (\ddot{q}_d - \ddot{q}) \quad (2.6)$$

donde e_q se denomina error de seguimiento por tratarse de la diferencia entre la posición de la junta en un momento dado y la posición deseada para la misma en función de la trayectoria dada. Así \dot{e}_q y \ddot{e}_q pasarían a ser los errores de velocidad y aceleración respectivamente.

En ese caso la ley de control queda:

$$\tau = H(q)(\ddot{q}_d + K_v\dot{e}_q + K_p e_q) + C(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_g(q) \quad (2.7)$$

La teoría de Control por Torque Computado fue uno de los primeros enfoques de control de movimiento basados en modelos creados exclusivamente para manipuladores en la robótica. Para su uso se hace explícito el conocimiento de las matrices $H(q)$, $C(q, \dot{q})$ y del vector $\tau_g(q)$. Además, se usa la trayectoria deseada de movimiento q_d y sus derivadas \dot{q}_d y \ddot{q}_d , así como las mediciones de posición y velocidad q y \dot{q} para calcular la acción de control. En el diagrama de control, la ley de control de la Ecuación (2.7) queda representada en la Figura 2.5.

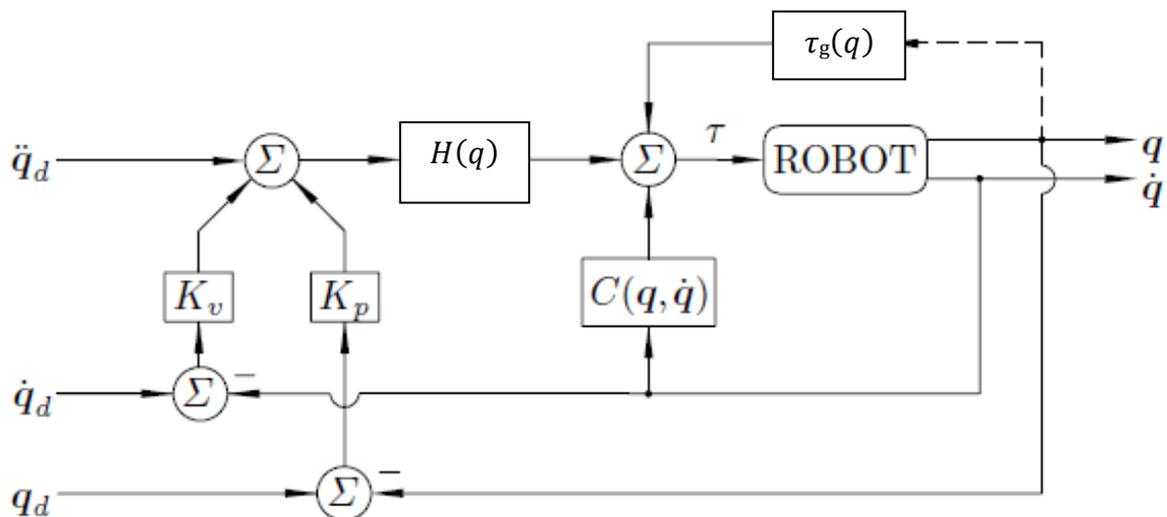


Figura 2.5 – Diagrama de bloques de Control por Torque Computado.

(Fuente: Adaptado de Kelly et al, 2005)

La igualación de la Ecuación (2.7) frente a la Ecuación (2.1) deja planteada la siguiente igualdad:

$$H(q)\ddot{q} = H(q)(\ddot{q}_d + K_v\dot{e}_q + K_p e_q) \quad (2.8)$$

Como $H(q)$ es una matriz definida positiva por ser una matriz de masa es invertible por lo cual se puede reducir la Ecuación (2.8) en:

$$\ddot{e}_q + K_v\dot{e}_q + K_p e_q = 0 \quad (2.9)$$

Para que la Ecuación (2.8) comience a tener sentido es necesario determinar o poder calcular K_v y K_p . Para desarrollar esta tarea, se tiene lo presentado por Lewis et al, 2003.

Partiendo del sistema de control expresado anteriormente y observando las ecuaciones (2.8) y (2.9) se tiene como resultado que el error dinámico es:

$$\epsilon = \ddot{e}_q + K_v\dot{e}_q + K_p e_q \quad (2.10)$$

Basado en la teoría de sistemas lineales, la convergencia del error de seguimiento expresada en 2.10 debe ser cero. Asimismo, el polinomio característico del lazo de control cerrado en la variable frecuencia pasa a ser:

$$\Delta(s) = |s^2 I + K_v s + K_p| \quad (2.11)$$

donde I representa la matriz identidad de dimensiones $(n \times n)$.

Para ello, comparando la Ecuación (2.10) con el polinomio característico para un sistema de segundo orden, Ecuación (2.11), se obtiene:

$$p(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2.12)$$

$$K_v = 2\zeta\omega_n \quad (2.13)$$

$$K_p = \omega_n^2 \quad (2.14)$$

donde ω_n es la frecuencia natural del sistema y ζ es el factor de amortiguamiento. No es deseable para el robot presentar excesos siguiendo una trayectoria deseada ya que los mismos podrían interferir con otros objetos del ambiente o incurrir en gastos de potencia u energía innecesarios, por lo tanto, las ganancias del control PD suelen ser seleccionados para el caso de amortiguamiento crítico, o sea $\zeta = 1$. En este caso se obtiene:

$$K_v = 2\sqrt{K_p} \quad (2.15)$$

$$K_p = K_v^2/4 \quad (2.16)$$

Como se puede observar de las ecuaciones (2.13), (2.14), (2.15) y (2.11), la frecuencia natural gobierna la velocidad de respuesta en cada componente de error. Para lo cual seleccionando valores altos se obtienen respuestas rápidas pero existen algunos límites superiores que se deben respetar en la elección.

$$\omega = \sqrt{k/J} \quad (2.17)$$

La Ecuación (2.17) presenta la frecuencia del primer nodo de resonancia para una junta del robot, J se corresponde con la matriz de inercia de esa junta (3×3) y k es la rigidez de la junta (3×3). Claramente, J cambia con la posición del robot, por lo que se debe buscar diferentes configuraciones para realizar los cálculos y verificar los mismos en posiciones diferentes. Para no excitar este modo de resonancia suele seleccionarse ω_n tal que cumpla:

$$\omega_n < \omega/2 \quad (2.18)$$

Otro límite superior de ω_n surge de consideraciones sobre la saturación del actuador. Si las ganancias del controlador PD son demasiado grandes, el par que debe ejercer el robot puede alcanzar sus límites superiores y dañar el motor o dispositivo. Por otro lado, pares de arranque excesivos afectan la dinámica vehicular produciendo que las ruedas deslicen sin avanzar. Para poder buscar una limitante en este sentido se debe realizar un breve estudio de la dinámica vehicular.

2.1.4 Equilibrio de fuerzas vehicular

Gillespie, 1992, presenta un claro y detallado resumen de las fuerzas y momentos que intervienen en la dinámica vehicular de un vehículo a ruedas. Este caso se estudia en particular para el arranque del mismo donde debe partir del reposo a su condición en movimiento.

Suponiendo que la potencia del motor es suficiente, la fuerza de arranque que se tiene en el vehículo está limitada por el coeficiente de fricción μ entre la rueda y la superficie bajo la siguiente ecuación:

$$F_x = \mu W \quad (2.19)$$

donde F_x es la fuerza en la dirección de tracción del vehículo, μ el coeficiente de fricción ya mencionado y W es la carga de la rueda. Este término W no simplemente se limita al peso de la rueda o el vehículo como se demostrará a continuación.

Sea la Figura 2.6 el diagrama de cuerpo libre (DCL) de un eje trasero de un vehículo estándar (auto) a tracción con un único motor. En esta imagen se presenta $W_r/2$; fuerza igual en cada rueda que representa el peso propio del vehículo distribuido de manera simétrica, T_d ; torque relacionado con la transmisión del motor, el cual en este caso no existe por estar el torque necesario generado en cada rueda y no transmitido desde un motor central, T_s torque que aparece en el sistema de amortiguamiento producto de un desbalance de carga, y por último W_y , fuerza de reacción sobre las ruedas que tiene como efecto el equilibrio del sistema frente a los torques mencionados.

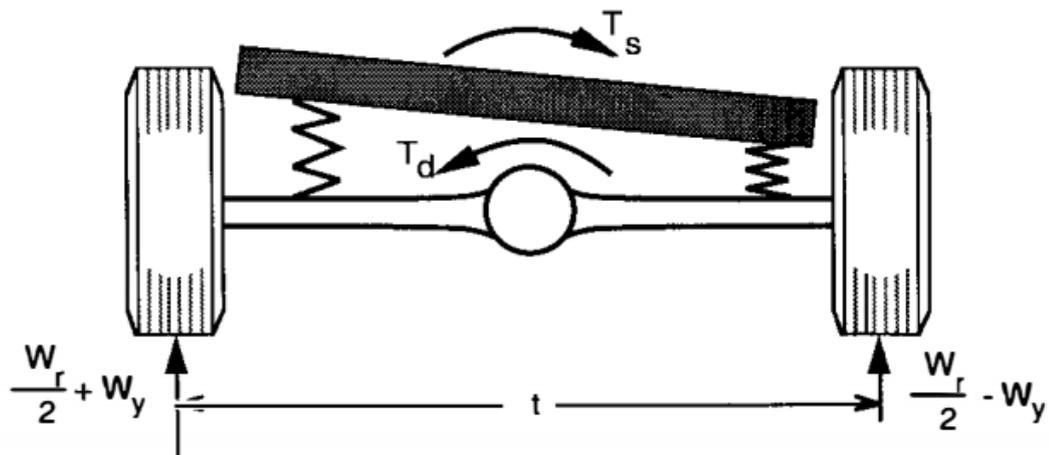


Figura 2.6 – DCL para un vehículo estándar a tracción.
(Fuente: Gillespie, 1992.)

Aunque el ejemplo presentado en la Figura 2.6 no se trata exactamente del caso presente en el robot de este trabajo su desarrollo dinámico y resultados finales pueden tomarse como válidos para el caso que presenta el auto con bloqueo de diferencial. Este caso permite en un vehículo convencional direccionar a que rueda enviar el torque a modo no de quedar deslizando sin avanzar, en nuestro vehículo esto es posible debido justamente a que el torque es independiente de cada rueda y uno puede seleccionar en que rueda ejercer el mismo a modo de conseguir el mejor avance.

Para el caso mencionado anteriormente el resultado presentado como F_x máxima, o sea, la fuerza de tracción máxima que puede desarrollar el vehículo viene dada por:

$$F_{x \max} = \frac{\mu \frac{Wb}{L}}{1 - \left(\frac{h}{L}\mu\right)} \quad (2.20)$$

donde b , L y h son distancias que dependen del vehículo. A continuación se presenta la Figura 2.7 donde se expresan las mismas para un vehículo convencional.

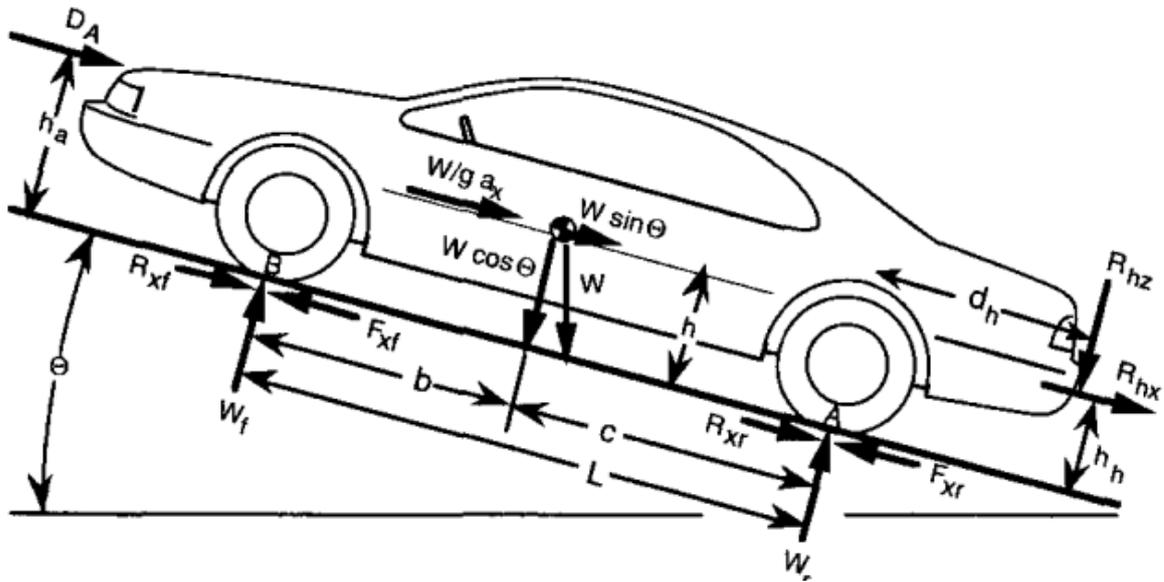


Figura 2.7 – Geometría vehicular.
(Fuente: Gillespie, 1992.)

Con este análisis se podrá determinar límites de fuerzas y torques a experimentar por las ruedas evitando la condición de deslizamiento. Con estos límites se busca calcular las ganancias del controlador teniendo en cuenta nunca sobrepasar el torque máximo de esta condición para no invertir en potencia que podría encausar en deslizamiento.

2.1.5 Dinámica de las articulaciones

El ecuacionamiento y desarrollo presentado hasta el momento lleva un análisis externo a los componentes del vehículo. El torque que es necesario imponer en los motores, para obtener los movimientos y posiciones deseadas bajo la teoría de control presentada, dependiendo de parámetros externos como son el peso, la acción de las fuerzas gravitatorias, etc. En la presente sección, se considera, que las juntas entre cada eslabón, o los motores interiormente presentan fricción.

El desarrollo presentado por Kelly et al, 2005, al igual que Kuo, 1996, menciona que los efectos de fricción en sistemas mecánicos son fenómenos que dependen de múltiples factores tales como la naturaleza de los materiales en contacto, la lubricación, la temperatura, etc. Por esta razón, sólo se pueden suministrar modelos aproximados de fuerzas y pares de

fricción. Sin embargo, se acepta que estas fuerzas y pares dependen de la velocidad relativa entre los cuerpos en contacto.

La fricción, por tal, es modelada por un vector que depende de la velocidad de la articulación o motor, así como de los coeficientes propiamente de fricción que se ven afectados por los factores ya mencionados. Los efectos de fricción son locales, es decir, se tendrá presente una componente para la articulación en el vehículo, así como una componente para cada uno de los motores.

Un modelo de fricción clásico, es aquel que combina los llamados fenómenos de fricción viscosa y fricción de Coulomb. Este modelo establece que el vector de fricción al cual llamaremos f , para el caso de un robot de n vínculos o juntas, está dado por:

$$f(\dot{\varphi}) = f_1(\dot{\varphi}) + \text{signo}(\dot{\varphi})f_2 \quad (2.21)$$

donde f_1 y f_2 son $n \times n$ matrices diagonales positivas definidas. Los elementos de la diagonal de f_1 corresponden a los parámetros de fricción viscosa, mientras que los elementos de f_2 corresponden a los parámetros de fricción de Coulomb, $\dot{\varphi}$ será la velocidad relativa para cada junta o velocidad de giro para el motor. [Kelly et al, 2005].

En el vehículo móvil presente en este trabajo, la Ecuación (2.21) se debe aplicar a la articulación y a cada uno de los motores. En cada uno de estos casos se debe determinar los coeficientes de fricción involucrados.

Los motores del vehículo son actuadores electromecánicos. Tales actuadores tienen su propia dinámica y es bien conocida por tratarse de los motores de corriente continua (CC). El modelo dinámico que relaciona la tensión de entrada aplicada al motor con el par de salida aplicado a la carga en términos de su posición angular, velocidad y aceleración es planteado tanto por Sanches et al, 2014, así como por Cova et al, 2006, desde el punto de vista práctico experimental.

Ambos trabajos determinan experimentalmente coeficientes de fricción viscosa para motores CC, llegando a concluir que sus valores son casi despreciables frente a otros, por

encontrarse del orden 10^{-6} . Frente a la fricción producto de la junta se desprecia el efecto de los motores.

Para la fricción desarrollada en la junta con el modelo de la Ecuación (2.21), son bastos los trabajos en el área. Se escogerán dos: Huang, 2001 y Kelly et al, 1999. Estos trabajos serán abordados en la parte de modelado de este trabajo.

Desarrollado el sistema de control, es importante analizar si se esta frente a un caso estable de control, dado que de estar en el caso contrario sería inútil el trabajo y hasta peligroso implementarlo. Cualitativamente un sistema se describe como estable si al iniciar el sistema en algún punto de operación deseada, este permanecerá alrededor del punto para siempre. Para analizar ello se utilizará la función de Lyapunov.

2.1.6 Método de Lyapunov

El método de Lyapunov es publicado en 1892 y escrito por Alezander Mikhailovich Lyapunov se encuentra dentro de la teoría de estabilidad de este autor, desarrolla una herramienta para el análisis de la estabilidad de sistemas lineales y no lineales. Es una generalización de los conceptos de energía mecánica asociados a un sistema físico: el movimiento de un sistema mecánico es estable si su energía mecánica total disminuye todo el tiempo.

El método consiste en construir la llamada función de Lyapunov, esto es una función escalar similar a la energía para el sistema, y ver si esta disminuye con el tiempo. El poder de este método proviene de su generalidad, ya que es aplicable a todos tipos de sistemas de control. Por el contrario, la limitación del método reside en el hecho de que no es siempre sencillo encontrar una función de Lyapunov para un sistema dado.

A continuación, basado en Lewis, 2004, se presentan los resultados de los teoremas de Lyapunov, estos dan las definiciones en el sentido de Lyapunov, que envuelven los conceptos de estabilidad que se buscan alcanzar con el sistema de control.

Dado un sistema no lineal variable con el tiempo que se describe con la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{x} = f(t, x) \quad ; \quad x(0) = x_0 \quad (2.22)$$

con $t > 0$, $x \in R^n$ y presenta un punto de equilibrio en el origen, o sea $f(t, 0) = 0$. Sea N un entorno del origen de tamaño:

$$N = \{x; \|x\| < \varepsilon\} \quad (2.23)$$

con $\varepsilon > 0$.

- Estabilidad: el origen es estable si para un $x \in N$ existe una función escalar $V(t, x)$ con derivada parcial continua que cumple:
 - $V(t, x)$ es definida positiva
 - $\dot{V}(t, x)$ es semidefinida negativa
- Estabilidad uniforme: el origen es estable uniformemente si para un $x \in N$ existe una función escalar $V(t, x)$ con derivada parcial continua que cumple:
 - $V(t, x)$ es definida positiva
 - $\dot{V}(t, x)$ es semidefinida negativa
 - $V(t, x)$ es decreciente
- Asintóticamente estable: el origen es asintóticamente estable si para un $x \in N$ existe una función escalar $V(t, x)$ con derivada parcial continua que satisface:
 - $V(t, x)$ es definida positiva
 - $\dot{V}(t, x)$ es definida negativa
- Global asintóticamente estable: el origen es globalmente asintóticamente estable si para $x \in N$ existe una función escalar $V(t, x)$ con derivada parcial continua que satisface:
 - $V(t, x)$ es definida positiva
 - $\dot{V}(t, x)$ es definida negativa $\forall x \in R^n$

- Uniforme asintóticamente estable: el origen es uniforme asintóticamente estable si para $x \in N$ existe una función escalar $V(t, x)$ con derivada parcial continua que satisface:
 - $V(t, x)$ es definida positiva, decreciente
 - $\dot{V}(t, x)$ es definida negativa

- Global uniforme asintóticamente estable: el origen es global uniforme asintóticamente estable si para $x \in N$ con $N = R^n$ existe una función escalar $V(t, x)$ con derivada parcial continua que satisface:
 - $V(t, x)$ es definida positiva, decreciente
 - $\dot{V}(t, x)$ es definida negativa
 - $V(t, x)$ se va a infinito de manera uniforme en el tiempo conforme $\|x\| \rightarrow \infty$

- Estable exponencialmente: el origen es exponencialmente estable si existen las constantes positivas α, β, γ que cumplen para $x \in N$:
 - $\alpha\|x\|^2 \leq V(t, x) \leq \beta\|x\|^2$
 - $\dot{V}(t, x) \leq -\gamma\|x\|^2$

- Global estable exponencial: el origen es global exponencialmente estable si es estable exponencialmente y se cumple $N = R^n$.

La función presentada como $V(t, x)$ en todas las definiciones es la llamada función de Lyapunov. Se puede apreciar como los teoremas ofrecen suficientes condiciones de estabilidad en el origen pero la dificultad del método claramente radica en poder ubicar la función candidata a ser función de Lyapunov para un sistema en particular.

Muchas veces se presentan casos donde $\dot{V}(t, x)$ simplemente cumple ser no positiva. En este momento es que surge el teorema presentado por LaSalle en 1961 que permite garantizar que el sistema es global asintóticamente estable en el punto de equilibrio y se presenta a continuación.

Dado un sistema autónomo no lineal donde el origen es un punto de equilibrio, se tiene:

- El origen es asintóticamente estable si solo si, cuando encontrada la función de Lyapunov $V(t, x)$ tal que $\forall x \in N$:
 - $V(t, x) > 0$
 - $\dot{V}(t, x) < 0$
 - $\dot{V}(x) = 0$ solo para $x = 0$

- El origen es global asintóticamente estable si se cumple lo anterior con $N=R^n$ o sea $V(t, x)$ no presenta límites superiores.

Seguendo lo presentado por Kelly et al, 2005, se presentan la función de Lyapunov candidata para la estrategia de control ya presentada. Esta función tiene por objetivo demostrar la estabilidad del sistema en torno al origen.

Previo al estudio de estabilidad y la designación de la función candidata es necesario incluir un parámetro auxiliar δ , el cual es una constante que cumple lo siguiente:

$$\lambda_{\min}\{k_v\} > \delta > 0 \quad (2.24)$$

donde λ_{\min} se corresponde con el valor propio mínimo de la matriz k_v . Considerando x vector de largo n no nulo se obtiene:

$$\lambda_{\min}\{k_v\}x^T x > \delta x^T x \quad (2.25)$$

como k_v , es una matriz simétrica se puede obtener:

$$x^T k_v x \geq \lambda_{\min}\{k_v\}x^T x \quad (2.26)$$

con lo cual utilizando la Ecuación (2.25) se llega:

$$x^T [k_v - \delta I]x > 0 \quad \forall x \neq 0 \in R^n \quad (2.27)$$

Lo expresado en la Ecuación (2.27) representa que la matriz $k_v - \delta I$ es positiva definida. Ahora tomando en cuenta que la matriz k_p es positiva y nuevamente δ como constante positiva se obtiene:

$$k_p + \delta k_v - \delta^2 I > 0 \quad (2.28)$$

Considerado lo presentado anteriormente se escoge la siguiente función candidata como función de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \dot{e}_q^T \dot{e}_q + \frac{1}{2} e_q^T [k_p + \delta k_v] e_q + \delta e_q^T \dot{e}_q \quad (2.29)$$

Dado lo presentado para la constante δ y los demás términos, se observa directamente que la función presentada en la Ecuación (2.29) es globalmente positiva definida. Ahora se debe evaluar su derivada que queda expresada:

$$\dot{V} = \ddot{e}_q^T \dot{e}_q + e_q^T [k_p + \delta k_v] \dot{e}_q + \delta \dot{e}_q^T \dot{e}_q + \delta e_q^T \ddot{e}_q \quad (2.30)$$

Sustituyendo en la expresión de la Ecuación (2.30) la expresión de \ddot{e}_q obtenida en la Ecuación (2.9) se tiene:

$$\dot{V} = -\dot{e}_q^T [k_v - \delta I] \dot{e}_q - \delta e_q^T k_p e_q \quad (2.31)$$

Dado que ε fue elegido $k_v - \delta I > 0$ y por la definición de k_p positiva definida la función \dot{V} expresada en la Ecuación (2.31) es globalmente positiva definida. Aplicando esto último a los teoremas de LaSalle se logra demostrar que para el bucle cerrado elegido, el origen es global asintóticamente estable. Por lo cual:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_q = 0 \quad (2.32)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0 \quad (2.33)$$

Estas ecuaciones (2.32) y (2.33) es lo que se busca, que el sistema converja a los errores a cero, osea lo desado sea igual a lo real.

2.2 APLICACIONES DE ROBÓTICA MOVIL

La robótica móvil juega actualmente un papel muy importante en el desarrollo de diversas áreas y aplicaciones que van desde diversos sectores tales como el industrial, militar, exploración espacial, entretenimiento, asistencia médica, seguridad, entre otras tantas [Arranz et al, 2006].

Al ser tan extensa la cantidad de desarrollos en esta área, se observa lo realizado para robots móviles con ruedas a tracción diferencial, como punto de partida. Para estos casos, hay trabajos muy completos, que incluyen modelado, simulación de resultados y hasta construcción de este tipo de robots [Ramos et al, 2010] [Bañó, 2003] [Angel et al, 2013]. Como resultado común de los trabajos mencionados, se observa la utilización de Matlab y Simulink como herramienta para el desarrollo de las simulaciones, detalle que comparten con este trabajo.

Para tomar un enfoque más cercano aún, se estudian casos relacionados con la agricultura. Hackenhaar et al, 2015, se encargan de realizar un extenso resumen o estado del arte de la robótica en las tareas agrícolas. En este trabajo se destaca la robótica móvil en tareas agrícolas, con un rápido avance en el mundo por su gran potencial para la mejora de la eficiencia y por lo tanto la productividad en el sector. Uno de los obstáculos que plantea para lograr la total implantación en el sector, es la necesidad de estar adaptando los desarrollos a cada caso específico para obtener los mejores resultados. Claramente, es el caso de este trabajo, que no pretende desarrollar tecnología nueva en el área, sino implementarla específicamente a las realidades locales de la agricultura en Uruguay con costos de inversión aceptables.

Siguiendo la línea del planteo anterior, se tienen trabajos como el desarrollado por Martín et al, 2012. Este trabajo evalúa trayectorias y sistemas de control para vehículos móviles autónomos en plantaciones de manzana. En este caso se dota al robot con herramientas específicas referidas para este cultivo, como son la detección de enfermedades y la dosificación de químicos necesarios. El trabajo presentado por Godoy et al, 2010, nuevamente es un desarrollo de una plataforma agrícola para cultivos en Brasil, donde se tiene por objetivo testear normas y protocolos para el correcto funcionamiento del robot en el

mencionado país. Ambos trabajos son claros ejemplos de casos particulares, donde su contribución buscó mejorar el área en un aspecto puntual de la realidad de su aplicación al igual que tiene como objetivo este trabajo, dar una contribución al marco nacional de la cosecha de manzana.

El uso de plataformas móviles autónomas debe enfrentar varios subproblemas o etapas, como lo son la localización del robot, planificación, generación de la trayectoria así como propiamente el control del robot. De este último caso se encarga el presente trabajo pero es importante tener en cuenta o a consideración los desarrollos en los otros aspectos.

El caso de planeamiento de trayectorias es necesario como segunda etapa de este trabajo para la toma de decisiones, nuevamente este tema en robótica dispara el abanico de opciones. Las curvas clotoideas son desarrollos muy utilizados pero acompañan una extensa matemática como presenta el trabajo de Torres y Moreno, 2015. Mas autónomos que este sistema de planeamiento de trayectorias es la utilización de GPS, como muestra el trabajo de Reyes, 2015, o lo presentado por Torres et al, 2014, donde el procesamiento de imágenes es el método utilizado para la planeación. Cualquiera sea el método escogido deberá acoplarse al desarrollo de control presentado.

Abordando lo estudiado en el área de control para robots móviles con características autónomas, se presentan varios métodos aplicados. El control por retroalimentación que permite linealizar el sistema es de las opciones de control más simples a ser utilizadas y por conocer los parámetros dinámicos del sistema es lo que permite ser aplicado en este trabajo. Esta posibilidad ahorra no tener que entrar en sistemas de control más complejos, como lo son el control adaptativo presentado por Slotine y Li, 1987 y Ortega y Spong, 1989.

Basado en la analogía propuesta con el brazo articulado se tiene el trabajo de Slotine, 1988. Este, presenta el modelo de un brazo planar y realiza el control del mismo aplicando control por torque con PD y control adaptativo. Estos resultados son base para el comienzo de este trabajo.

3 MODELO Y DISEÑO VEHICULAR

3.1 DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO

El vehículo en el que se basa este trabajo ya fue presentado en la Figura 1.1 y se trata de una plataforma robótica de cuatro ruedas, con dos módulos unidos por una articulación central. El prototipo fue diseñado para superar los terrenos más difíciles contando con motores de gran torque ubicados dentro de las ruedas los cuales junto con el buen despeje al piso favorecen la tracción en cualquier situación. En la Figura 3.1 se presenta un esquema del chasis articulado con sus módulos.

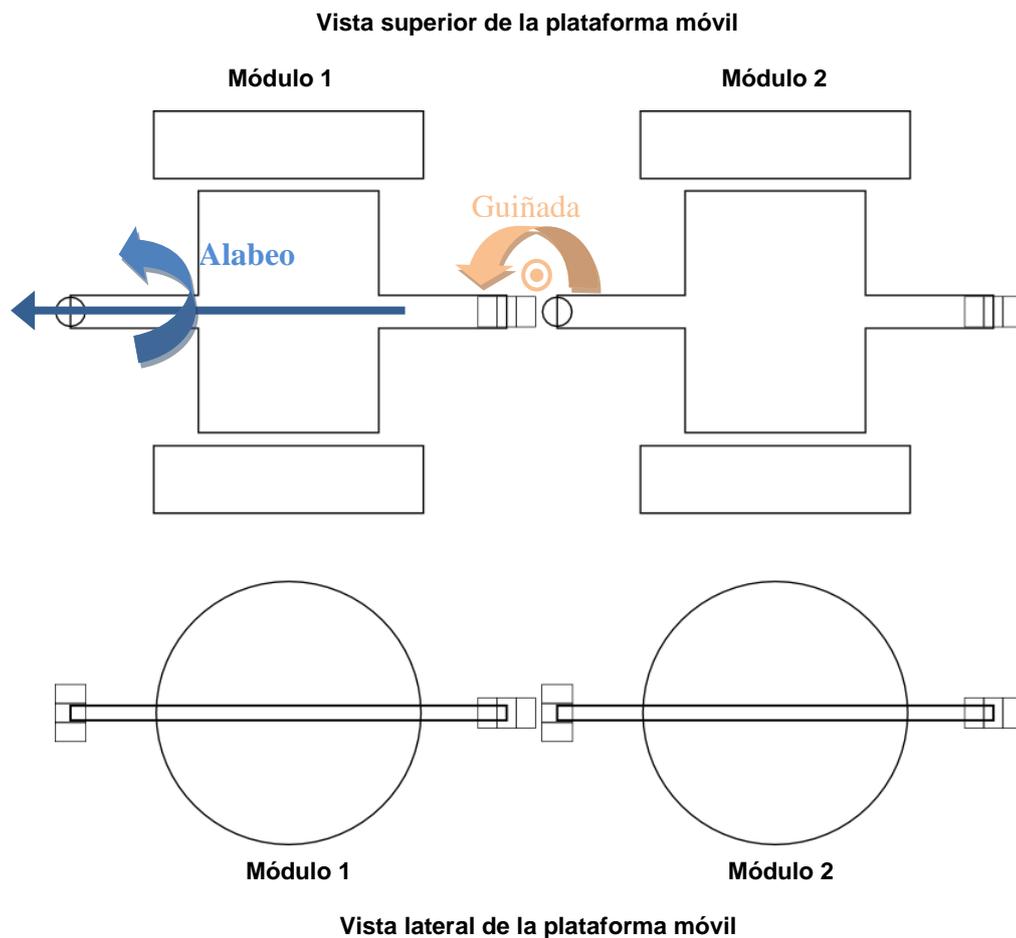


Figura 3.1 - Módulos articulados centralmente en vista superior y lateral

Cada módulo de los que se pueden observar en la figura consiste en dos ruedas cada una con motores independientes. La articulación central entre módulo permite dos grados de libertad entre el módulo u eje trasero y delantero. Estos grados de libertad permiten entre los módulos diferentes ángulos de alabeo y guiñada, conforme es presentado en la figura 3.1 y 3.2.

El objetivo de esta configuración es el de mejorar sus habilidades todo terreno posibilitando el contacto de las cuatro ruedas con la superficie en todo momento. Además, el diseño de la articulación, presentada en la Figura 3.2, contempla el anclaje de un sensor de posicionamiento angular, lo que tendrá como objetivo medir el ángulo formado entre dos segmentos consecutivos del robot.



Figura 3.2 – Articulación central del vehículo

La Figura 3.3 muestra en detalle la construcción de la articulación así como los materiales utilizados.

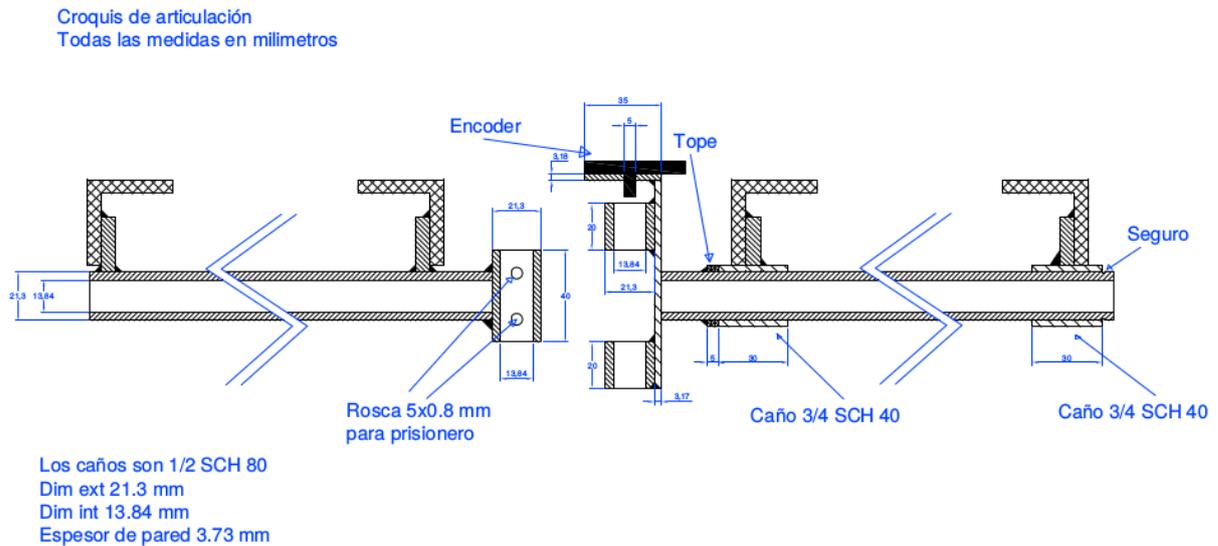


Figura 3.3 – Detalle de articulación central del vehículo.

El movimiento del robot como está a cargo de 4 ruedas de 12" como la indicada en la Figura 3.4. Estas ruedas cuentan cada una con un motor de 250W funcionando a 24V y baterías de 20Ah. Las ruedas se encuentran fijas y permiten el movimiento por velocidad diferencial ya que el control de las mismas se realiza de forma independiente con una controladora en cada una.

La selección de los motores incluidos en la ruedas, se basó en los requerimientos del proyecto. Estos exigían que cada módulo fuera capaz de transportar medio bin de manzanas, el cual tiene una carga asociada de 200 kg. Es decir, cada par de motores debe ser capaz de transportar 100 kg de carga además del peso de la plataforma y los componentes de funcionamiento. Para esto luego de realizar los cálculos se obtuvo como resultado que la potencia mínima necesaria debía de ser de aproximadamente 150W por motor para una velocidad baja de circulación.

Junto con éste cálculo y las opciones disponibles en el mercado se decantó por un motor construido dentro de rueda como se muestra en la Figura 3.4 para así simplificar su construcción, evitar peso innecesario o incluir reductores o elementos de transmisión pasibles de falla.



Figura 3.4 - Rueda con motor.

La controladora, presentada en la Figura 3.5, fue provista por el fabricante y no posee código abierto. Las posibilidades de programarla son muy bajas y se limitan a las definidas en el software del fabricante (aceleración, velocidad máxima, potencia de frenos regenerativos, habilitar o no sensor Hall, medidas de protección de la batería y previsión de sobrecargas, etc.).



Figura 3.5 - Controladora de potencia.

La energía para el sistema es provista por una batería de 6 celdas de Litio Polímero de 24 V y 20 Ah. Los pares o fuerzas de control a aplicar se reciben desde un software de alto nivel para llevar adelante la navegación del robot. Para integrar las controladoras al software de alto nivel, se diseñó un Printed Circuit Board (PCB) que permite interactuar con la controladora original utilizando una placa de Entrada/Salida.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se presenta lo desarrollado en el trabajo de Puignau, 2017, lo cual es base para este trabajo. El autor presenta en su trabajo los fundamentos físicos utilizados para desarrollar el ecuacionamiento del vehículo móvil así como todas las simplificaciones usadas para llegar al mismo.

En una primera instancia busca partir de un modelo ya conocido de brazo biarticulado para realizar una analogía del mismo con el vehículo móvil y extrapolar resultados ya desarrollados por otros autores. Como brazo biarticulado utiliza el modelo de los dos primeros grados de libertad de un robot SCARA.

La analogía propuesta se basa en el hecho de que el comportamiento del robot móvil es asimilable al de un robot SCARA funcionando en un plano y el SCARA presenta detalles comparables con la cinemática en dos dimensiones de la plataforma móvil.

Los torques presentes en los motores SCARA se toman como semejantes a la diferencia de fuerzas entre las ruedas las cuales pueden ser controladas mediante la entrega de par diferencial a cada motor. Las barras del robot SCARA corresponderían con cada módulo de la plataforma. El último paso de la equivalencia es el de convertirlo en un robot móvil, trasladando la referencia fija del robot SCARA a través de la trayectoria de la plataforma.

Lo mencionado en el párrafo anterior puede observarse en la Figura 3.6. En la misma se representa la plataforma móvil junto con un robot SCARA (diseño en gris) y los parámetros con los cuales se aborda el desarrollo cinemático del robot SCARA y por lo cual se extrapolan a la plataforma móvil. El punto representado en el origen es el mencionado en el último paso de la equivalencia, que debe ser “soltado” para pasar a un vehículo móvil a diferencia de un SCARA con base fija.

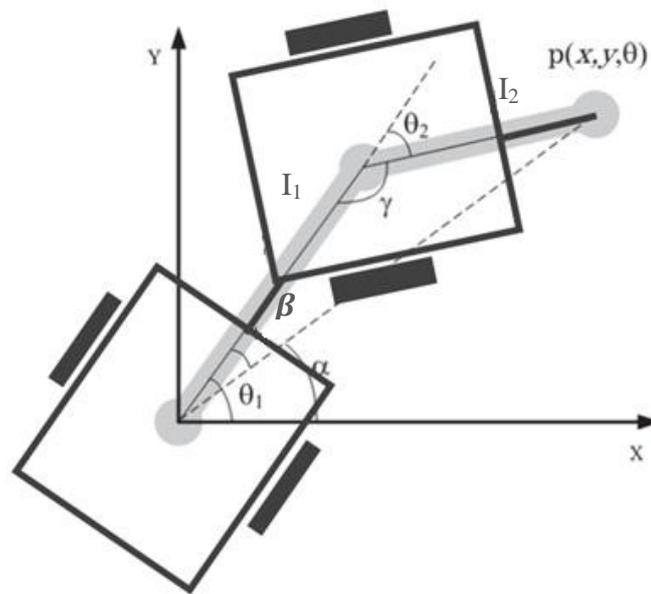


Figura 3.6 - Esquema plataforma móvil relacionado con Robot Scara.

(Fuente: Puignau, 2017)

Considerando lo mencionado, el autor, aplica a resultados del Robot SCARA la adaptación de la geometría y las restricciones correspondientes de la plataforma móvil, así como también, el hecho de generar un nuevo sistema de coordenadas móviles que se desplazará solidariamente con el vehículo y llega al ecuacionamiento presentado en las ecuaciones (3.1) y (3.2). Para poder abordar el mismo se presenta la siguiente Tabla 3.1 de parámetros y variables necesarios:

Tabla 3.1 - Variables del ecuacionamiento cinemático.

| Variable | Descripción |
|------------|--|
| θ_1 | Posición para el módulo 1 en el espacio de juntas. |
| θ_2 | Posición para el módulo 2 en el espacio de juntas. |
| τ_1 | Torque aplicado al módulo 1. |
| τ_2 | Torque aplicado al módulo 2. |
| m_1 | Masa del módulo 1. |
| m_2 | Masa del módulo 2. |
| I_1 | Inercia referida al módulo 1. |
| I_2 | Inercia referida al módulo 2. |
| L_1 | Largo tráiler 1. |
| L_2 | Largo tráiler 2. |

Así, el ecuacionamiento propuesto en el trabajo de Puignau, 2017, es:

$$\begin{aligned} \tau_1 = I_1\ddot{\theta}_1 + I_2\ddot{\gamma} + \frac{1}{4}m_1L_1\left(-\dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 - \ddot{\theta}_1 \sin \theta_1\right)(L_2 \sin \gamma + L_1 \sin \theta_1) \\ - \frac{1}{4}m_1L_1\left(-\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 - \ddot{\theta}_1 \cos \theta_1\right)(L_2 \cos \gamma + L_1 \cos \theta_1) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = I_2\ddot{\gamma} + \frac{1}{4}m_1L_1\left(-\dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 - \ddot{\theta}_1 \sin \theta_1\right)(\sin \gamma) \\ - \frac{1}{4}m_1L_1L_2\left(-\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 - \ddot{\theta}_1 \cos \theta_1\right)(\cos \gamma) \end{aligned} \quad (3.2)$$

donde:

$$\gamma = \theta_1 + \theta_2 \quad (3.3)$$

Estas ecuaciones presentan los torques necesarios τ_1 y τ_2 , a aplicar en cada plataforma para ser direccionada según los parámetros cinemáticos descritos anteriormente. La determinación de los pares depende de conocer todas las variables cinemáticas presentes en cada módulo.

4 CONTROLADOR

En este capítulo se realiza el diseño del controlador para el vehículo móvil. El mismo se va desarrollando en etapas, a modo de poder ir observando simulaciones acordes a cada modelo que permitan validar los avances y ahorrar tiempo en busca de errores en las modificaciones modelo a modelo.

El objetivo final, es lograr el control del vehículo móvil mediante la estrategia de Control por Torque Computado. Un único diagrama de control bajo esta lógica, combinado con el ecuacionamiento del vehículo, determinará el torque resultante necesario a aplicar en cada módulo para lograr llevar al robot de la posición θ para cada módulo al θ_d , del módulo respectivo, o sea, del ángulo de referencia que ocupa el vehículo en cualquier instante al ángulo deseado que se encuentra alineado con el punto final de destino. Así ambos módulos se encontrarán alineados con la posición final de destino y bastará aplicar una velocidad constante para lograr su avance al punto final. El torque resultante necesario para la alineación es posible gracias al resultado de poder aplicar a cada rueda una potencia diferente, o sea del funcionamiento diferencial ruedas.

El modelo de Control por Torque Computado parte de la Ecuación (2.3), esto es, para cada módulo se debe determinar la función de retroalimentación de control PD. La misma se considerará:

$$v = K_v(-\dot{q}) + K_p(q_d - q) \quad (4.1)$$

Es claro que no se trata de la misma ecuación presentada en (2.3), ya que el objetivo es hacer un seguimiento en trayectoria y, en principio, no se cuenta con velocidades ni aceleraciones deseadas lo cual simplificó la ecuación.

Aplicadas las simplificaciones presentadas en la Ecuación (4.1), la ecuación de control presentada en la Ecuación (2.7) queda:

$$\tau = H(q)(-K_v\dot{q} + K_p e_q) + C(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_g(q) \quad (4.2)$$

Otro detalle presente en este trabajo consiste en despreciar el término de la Ecuación (4.2) referido a las fuerzas gravitatorias. Eso se debe a que nuestro modelo y ecuacionamiento considera esto como un problema plano, paralelo a la superficie de la tierra por lo cual este torque no tendrá contribución o resistencia en el torque a desarrollar por las ruedas para el caso plano. Tomando en cuenta esta hipótesis la relación para la ley de control queda:

$$\tau = H(q)(-K_v\dot{q} + K_p e_q) + C(q, \dot{q})\dot{q} \quad (4.3)$$

Esta ecuación simplificada sumada al modelo cinemático del vehículo presentado en el Capítulo 3, permitirá desarrollar el controlador. Aún bastara simplificar más el modelo para los primeros casos de simulación. Esto incluye despreciar el término asociado a las fuerzas de Coriolis y centrífuga, su presencia práctica será compensada por la retroalimentación, dejando la ecuación de control como:

$$\tau = H(q)(-K_v\dot{q} + K_p e_q) \quad (4.4)$$

Volviendo a lo planteado inicialmente se pasa a desarrollar de los controladores comenzando con un modelo para brazo biarticulado.

4.1 CONTROL DEL BRAZO BIARTICULADO

El origen del modelo de control para el vehículo móvil desarrollado en este trabajo es el de un brazo robot biarticulado, por lo cual se busca de este último robot un caso de estudio que presente los resultados de aplicar la estrategia de Control por Torque Computado. Obtenido esto, se procede a reproducir las simulaciones de este sistema de control, validarlas con los resultados encontrados, para, así tomar este control como punto de partida y modificarlo con las ecuaciones y parámetros de nuestro robot móvil.

El trabajo planteado por Slotine y Li, 1987, estudia el control adaptativo en un brazo manipulador de dos grados de libertad desarrollado en el Whitaker College of Health Sciences en el Massachusetts Institute of Technology. Este brazo consiste en dos eslabones con una articulación que los vincula y otra en la base, lo que permite su movimiento en el plano horizontal. Esto último ayuda a despreciar los efectos gravitacionales. Su objetivo inicial de

desarrollo era imitar los movimientos de un brazo humano. Tiene dos motores montados en la base fuera de las articulaciones del robot y un mecanismo de 4 barras externo es el que trasmite el torque de los motores a cada eslabón. El esquema del brazo es presentado en la Figura 4.1.

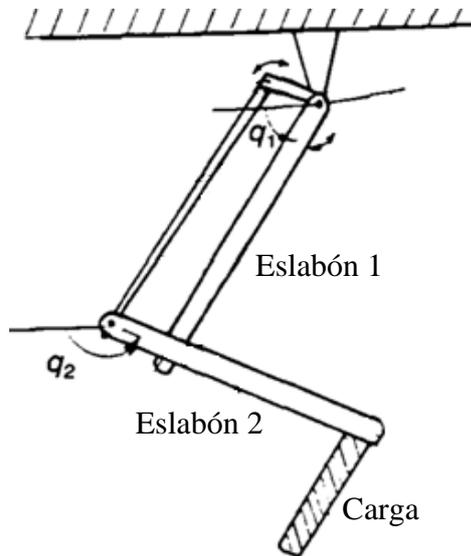


Figura 4.1 – Esquema del brazo robótico.
(Fuente: Slotine y Li, 1987)

El objeto del trabajo es estudiar el control adaptativo en este robot y lo realiza de manera de comparar el seguimiento de una trayectoria deseada usando control adaptativo, un controlador puramente PD y un Control por Torque Computado. La experiencia la realiza midiendo directamente en el robot por lo cual nuestra simulación será cotejada contra resultados experimentales. El resultado que brinda de esta experiencia para cada tipo de control es el gráfico de error de seguimiento para cada eslabón del brazo. Este error se determina para este ejemplo, entre el ángulo q_1 y q_2 indicados en la Figura 4.1 para cada eslabón, respectivamente, y el ángulo deseado para cada uno de esos casos impuesto como trayectoria a seguir.

En la Figura 4.2 se presenta el diagrama de control realizado para este caso. Se realiza en Simulink y dentro del mismo se carga el ecuacionamiento y los valores facilitados por el trabajo de Slotine y Li, 1987, para realizar el Control por Torque Computado.

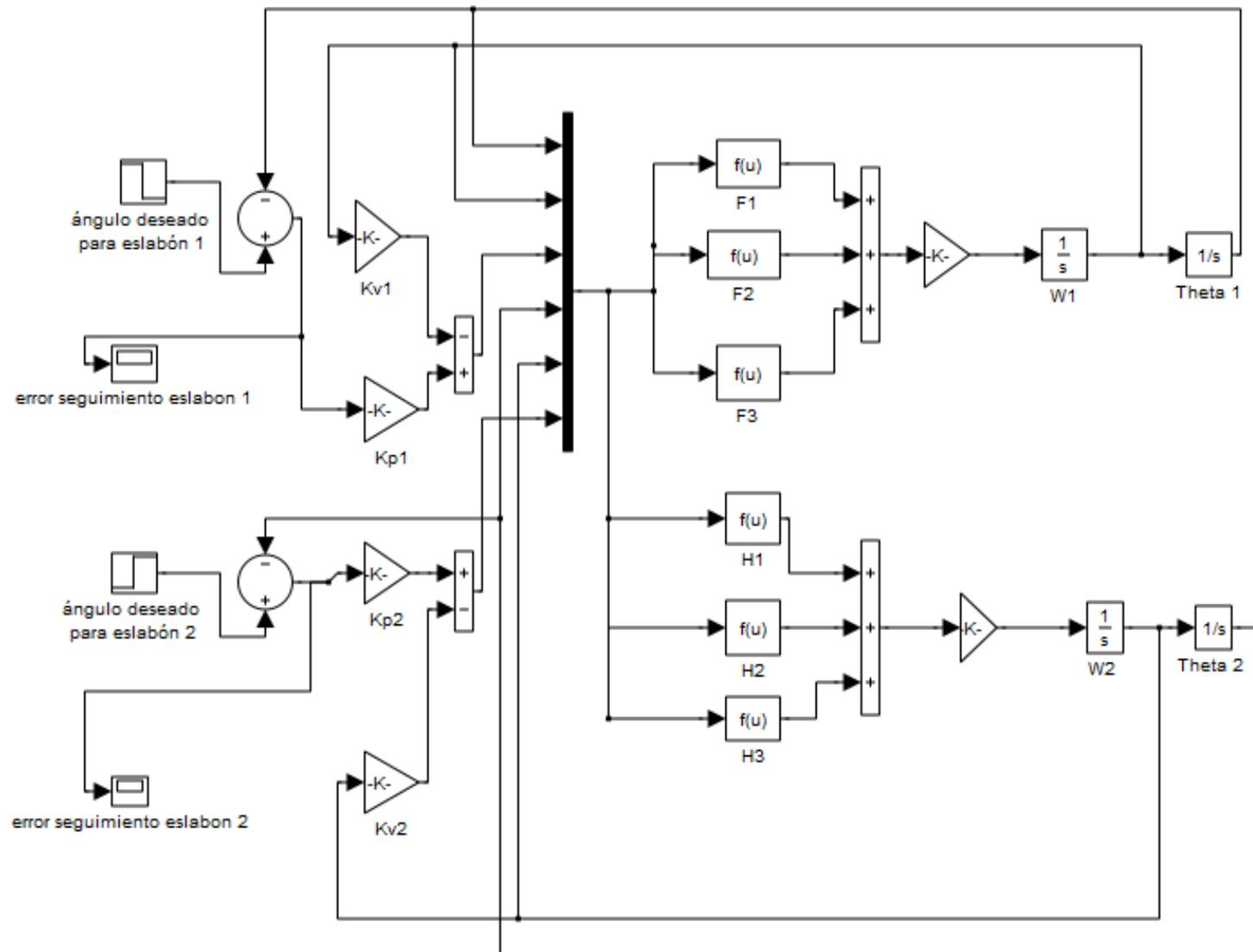


Figura 4.2 – Diagrama de Control por Torque Computado en Simulink.

La experiencia práctica se realiza en 1 segundo. En los primeros 0,5 segundos se le brinda al robot bajo cada sistema de control una trayectoria deseada que debe seguir. Pasado ese tiempo, se lo deja libre otros 0,5 segundos para que termine de posicionarse en referencia a las posiciones finales otorgadas. Dado que no se cuenta con la función que se impuso durante los primeros 0,5 segundos, sino simplemente sus puntos de origen y fin se realiza solo la simulación de los finales 0,5 segundos donde el robot se posiciona finalmente.

A continuación se presentan las gráficas con los resultados obtenidos en la simulación. Estas son la Figura 4.3 correspondiente al primer eslabón y Figura 4.4 correspondiente al segundo eslabón.

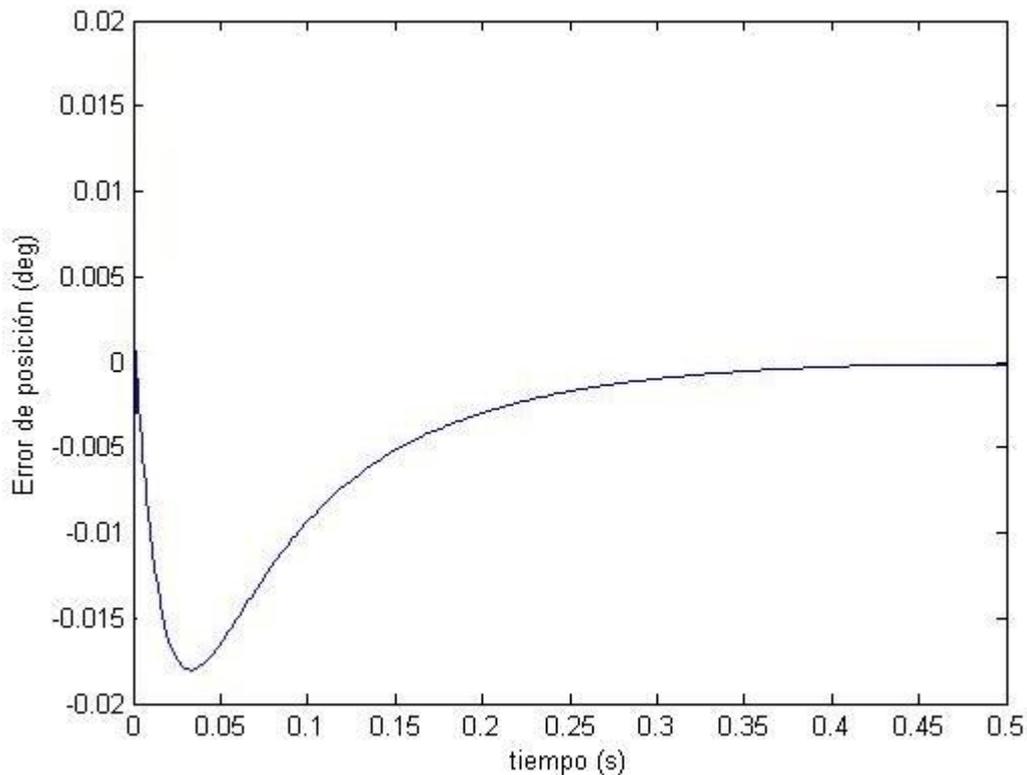


Figura 4.3 – Gráfico de error de seguimiento para eslabón 1.

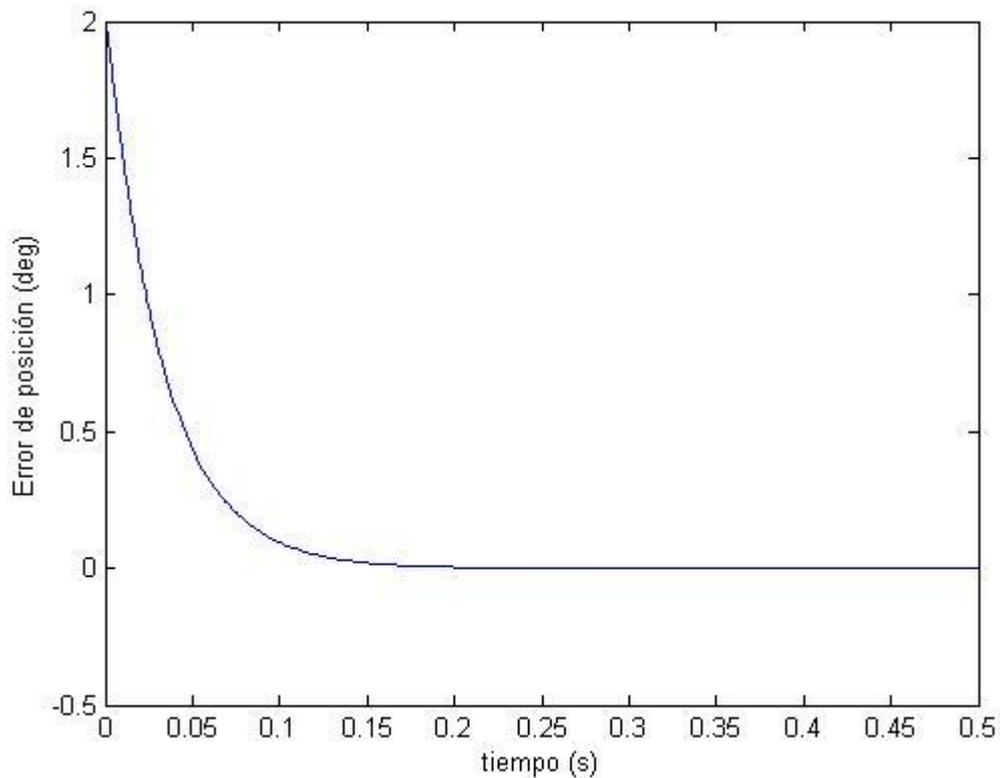


Figura 4.4 – Gráfico de error de seguimiento para eslabón 2.

Analizando los gráficos, son consistentes con los resultados presentados por Slotine y Li, 1987. Ellos presentan los resultados en grados pero el ecuacionamiento es dado en radianes por lo cual los resultados son expresados para este caso en esta última unidad. En líneas generales ambos gráficos se comportan de manera similar a los resultados experimentales pero dada la falta de resolución en los resultados del trabajo no se puede realizar una exhaustiva comparación punto a punto.

4.2 CONTROL DEL VEHÍCULO MOVIL

Basados en el controlador desarrollado en la sección anterior se procede a modificarlo para adaptarlo al vehículo móvil de este trabajo. Esto corresponde a cambiar:

- el ecuacionamiento correspondiente a la cinemática del móvil;
- las ganancias del lazo retroalimentador PD.

Para el caso del ecuacionamiento ya fue desarrollado por Puignau, 2017, y presentado en la Sección 3.2. Basta modificar el mismo en el esquema de control de la Figura 4.2.

Para determinar las ganancias relacionadas al PD en la Sección 2.1.3 del desarrollo teórico se presentó un método analítico para determinar las ganancias, relacionadas con la rigidez del vehículo. Este método es muy engorroso y requiere varios resultados experimentales y su validación posterior, por lo cual se prefiere abordar un método basado en la práctica y el funcionar cotidiano del robot. Es para esto que se utiliza lo presentado sobre la dinámica del robot, Sección 2.1.4 del capítulo teórico y se busca limitar el torque de cada rueda para evitar condiciones de deslizamiento.

4.2.1 Determinación de las ganancias K_v y K_p

Según lo presentado en la Sección 2.1.4, la fuerza máxima de tracción desarrollada para un vehículo que parte del reposo y evita la condición de deslizamiento de sus ruedas viene dada por la Ecuación (2.20), o sea reescribiendo la misma:

$$F_{x \max} = \frac{\mu W b}{L - (h\mu)} \quad (4.5)$$

Partiendo de la Ecuación (4.5), se busca estudiar el caso límite para evitar el deslizamiento en la plataforma. Este caso límite dará una fuerza máxima, o sea un torque máximo en la rueda. Limitar el torque que entrega los motores con el valor calculado mediante las ecuaciones de control a utilizar es la estrategia desarrollada para determinar k_v y k_p .

El par máximo y por lo tanto la fuerza de tracción máxima se da en el arranque para vehículos a tracción [Herrera, 2016]. Esta condición representa que la velocidad del vehículo es nula dejando la ley de control, Ecuación (4.3), expresada como:

$$\tau = H(q)(K_p e_q) \quad (4.6)$$

Esta ecuación representa la ley de control a utilizar en cada uno de los módulos para posicionar el mismo con su posición deseada para la condición de velocidad nula, o sea en un arranque. Este torque es el resultado de la diferencia de esfuerzos presentes en cada rueda producido por cada motor. Esto se observa en la Figura 4.5.

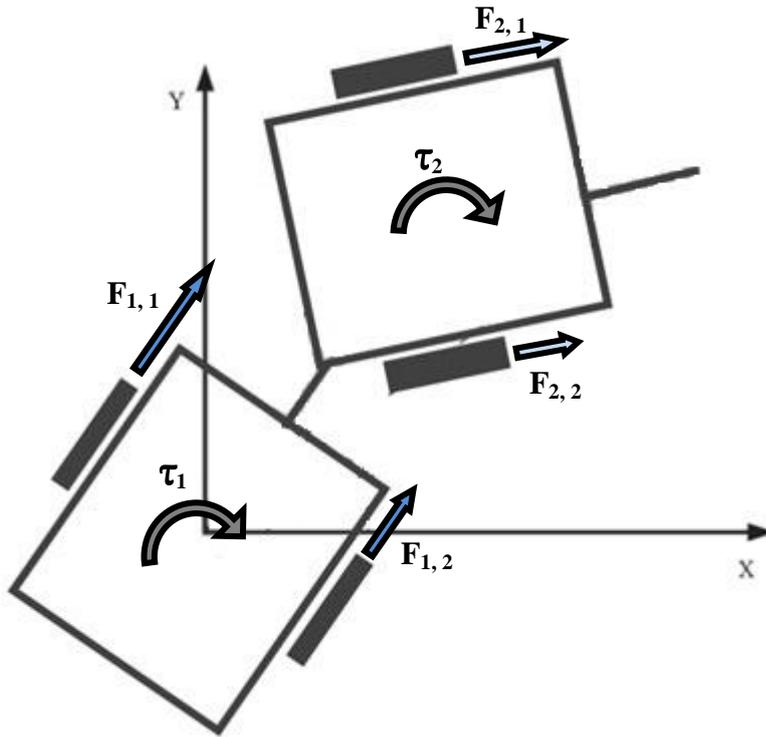


Figura 4.5 – Representación de torques y fuerzas sobre la plataforma móvil.

Observando la Figura 4.5, la Ecuación (4.6) representa los respectivos τ_1 y τ_2 aplicados en cada módulo mientras que la Ecuación (4.4) determina la fuerza máxima que podría tomar cualquiera de las $F_{1,1}$, $F_{1,2}$, $F_{2,2}$ y $F_{2,1}$ representadas en cada rueda. La relación para estos parámetros queda expresado en las ecuaciones (4.7) y (4.8).

$$\tau_1 = (F_{1,1} - F_{1,2})a \quad (4.7)$$

$$\tau_2 = (F_{2,1} - F_{2,2})a \quad (4.8)$$

donde a es el ancho del tráiler o cada módulo.

Continuando con el razonamiento y la determinación de parámetros, para poder aplicar el ecuacionamiento desarrollado falta analizar las constantes presentes en la Ecuación (4.5). Las mismas vinculan relaciones geométricas de los vehículos como se observa en la Figura 2.7. Es necesario ubicar las mismas en el vehículo móvil.

La Figura 4.6 muestra el tráiler en su vista lateral. En el mismo es ubicado un bin de peso W y se atribuye a su centro geométrico el centro de masa del sistema dada la simetría y que el peso de la plataforma frente al bin cargado es despreciable. Para esta representación se ubican en la figura los parámetros geométricos análogos necesarios para la Ecuación (4.5) y observados en la Figura 2.7.

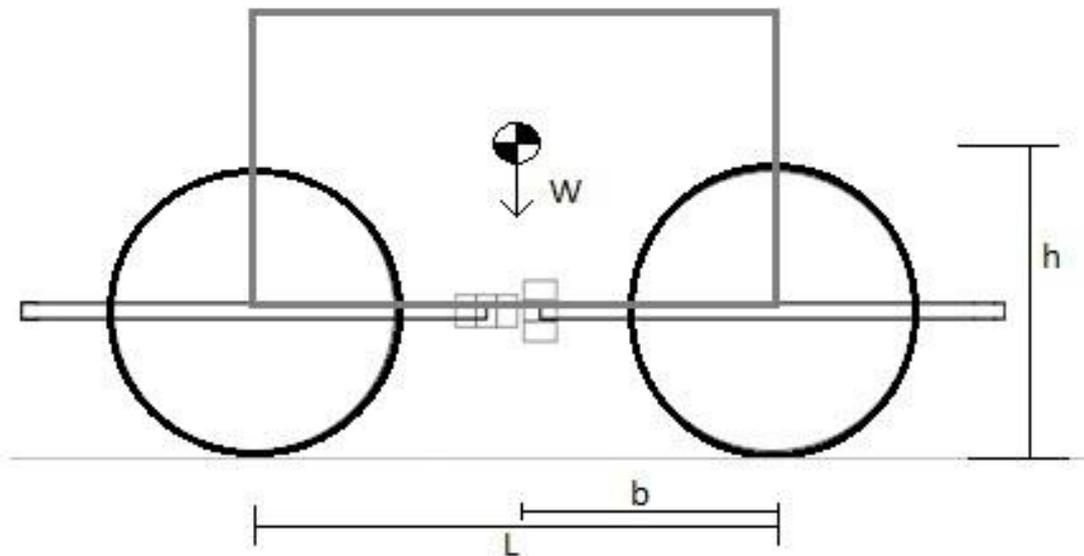


Figura 4.6 – Representación de distancias en la plataforma móvil.

Por último queda la determinación del coeficiente de fricción estático entre la rueda y la superficie, este tema en si mismo podrá ser un capítulo aparte y presentar un análisis para los diferentes suelos, ruedas y condiciones. En la siguiente tabla 4.1, del autor Jazzar, 2008, se presentan algunos casos tipos y se decide trabajar con lo que se considera la situación típica o mas común que desarrollara la plataforma en Uruguay.

Tabla 4.1 – Diferentes coeficientes de fricción para neumáticos según la carretera.

| <i>Condición de carretera o pavimento</i> | μ |
|---|-------|
| <i>Muy buen hormigón</i> | 0,8 |
| <i>Muy buen asfalto</i> | 0,8 |
| <i>Hormigón medio</i> | 0,6 |
| <i>Asfalto medio</i> | 0,6 |
| <i>Hormigón en malas condiciones</i> | 0,55 |
| <i>Buen pavimento en paños</i> | 0,6 |
| <i>Asfalto en malas condiciones</i> | 0,5 |
| <i>Buen pavimento en piedra</i> | 0,75 |
| <i>Buen pavimento natural</i> | 0,5 |
| <i>Pavimento en piedra en malas condiciones</i> | 0,55 |
| <i>Nieve poco profunda (5cm)</i> | 0,1 |
| <i>Nieve espesa (10cm)</i> | 0,3 |
| <i>Camino natural sin mantenimiento</i> | 0,55 |

(Fuente: Jazar R., 2008)

Por lo cual, basados en la tabla se selecciona el caso de camino natural sin mantenimiento ya que se considera el caso estándar donde circulará el vehículo móvil. Dado que para esta condición la tabla presenta un intervalo se decide trabajar con el número 0,55 a modo de promedio de los valores presentados por el autor.

Recopilando todos los datos y ecuaciones presentadas al momento ya se dispone de los elementos para realizar el cálculo, basta suponer dos hipótesis más, a modo de simplificar y considerar el caso límite. Estas son:

- Que solo una rueda de cada plataforma será la que estará aplicando el par mientras que la otra no es necesario que actúe. Esto simplifica las ecuaciones (4.7) y (4.8).
- Que nos encontramos en el caso más desfavorable donde el error son 90° entre la posición actual y la deseada. Esto se aplica directamente en la Ecuación (4.6).

Estos comentarios son a modo de estudiar un caso particular, no obstante, planteado el problema, se puede utilizar cualquier otra configuración para determinar las ganancias del sistema. Con respecto al error de seguimiento, se busca que el mismo nunca supere más de 90° . Este vehículo no permite instantáneamente alinearse con cualquier ángulo deseado y para errores superiores a 90° es aconsejable utilizar posiciones intermedias de posicionamiento a modo de conducir a movimientos más suaves.

Juntos todos los parámetros a utilizar y relacionando las ecuaciones (4.5), (4.6), (4.7) y 4.8, al caso de un módulo solo y matriz de inercia simétrica a máxima carga se obtiene la siguiente el siguiente resultado:

$$K_p = 7,3 /s^2$$

Ambas constantes iguales para cada módulo. Aplicando la Ecuación (2.15) se obtiene para ambos módulos iguales el siguiente resultado:

$$K_v = 5,2 /s$$

Con estos resultados se procede a realizar las primeras simulaciones. Independiente de haber realizado los cálculos para plena carga se puede apreciar de la relación de los mismos su independencia con respecto a la carga. Simplemente responden a una relación geométrica del sistema.

4.2.2 Simulación al sistema inicial

Se cuentan con todos los elementos para comenzar a realizar las simulaciones del sistema. Se plantea el ecuacionamiento de la plataforma en el controlador planteado al trabajo de Slotine y Li, 1987, al cual además se le modifican las ganancias con los valores obtenidos.

Realizamos en esta primera instancia simulaciones con las ganancias constantes y desviación inicial constate, pero modificando caso a caso el peso de la plataforma. Esto último se realiza en 3 casos detallados a continuación:

- caso 1, sin peso, o sea solo la masa del tráiler;
- caso 2, mitad de carga;
- caso 3, plataforma totalmente cargada.

Las divisiones de carga entre cada caso siempre es igual, repartidos homogéneamente entre cada módulo, viéndose simplemente modificados por el hecho de pesar un módulo más que otro debido a contener las baterías y el sistema de control.

La condición inicial de desviación impuesta para cada módulo durante los 3 casos es la misma, se trata de posicionar los mismos con ángulo final cero pero partiendo el módulo inicial de una desviación de 45° y el segundo módulo de una desviación de 30° .

La Figura 4.7 representa el esquema de control utilizado en este caso. Las Figuras consecutivas son los datos obtenidos de error de posición y torque entregado en cada módulo a modo de obtener el ángulo deseado. Todas las simulaciones fueron realizadas para 0.5 segundos.

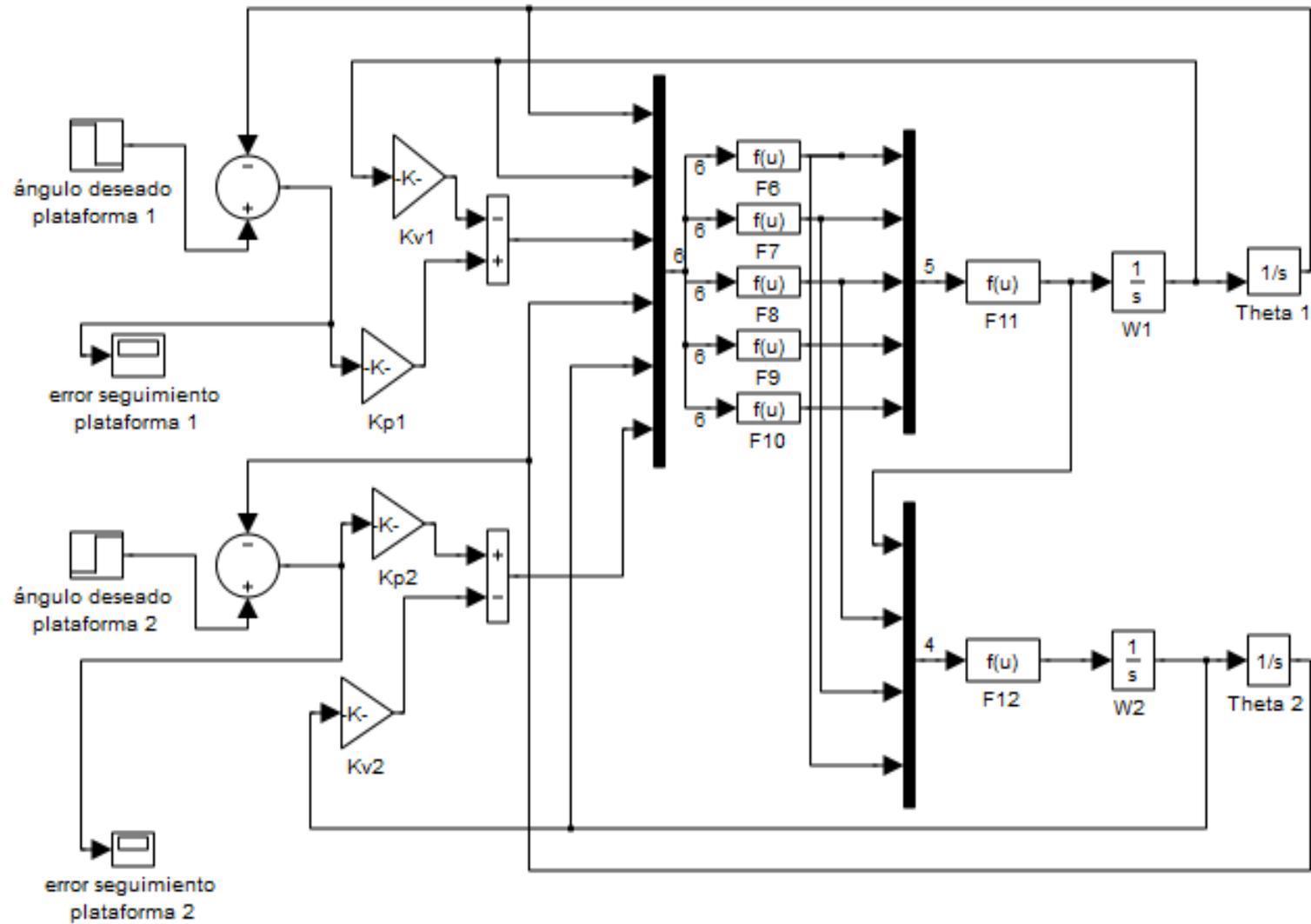


Figura 4.7 – Diagrama de Control por Torque Computado en Simulink para el vehículo móvil.

Se presentan a continuación todos los resultados obtenidos de error de posicionamiento para la plataforma 1 en los tres casos mencionados, variando únicamente la masa del vehículo móvil.

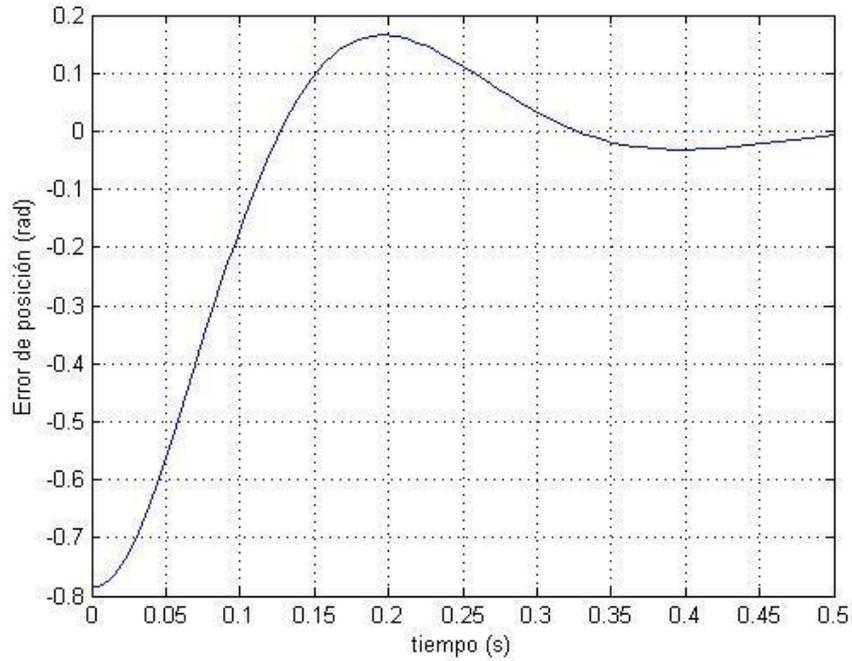


Figura 4.8 – Error de seguimiento para modulo 1 caso 1, sin carga.

Para el gráfico presente en la Figura 4.8 se observa posterior al arranque un sobre pico de 0,17 rad a los 0,159 segundos de comenzada la simulación. Al módulo en este caso le lleva más de 0,5 segundos en posicionarse en su punto consigna de ángulo 0 rad.

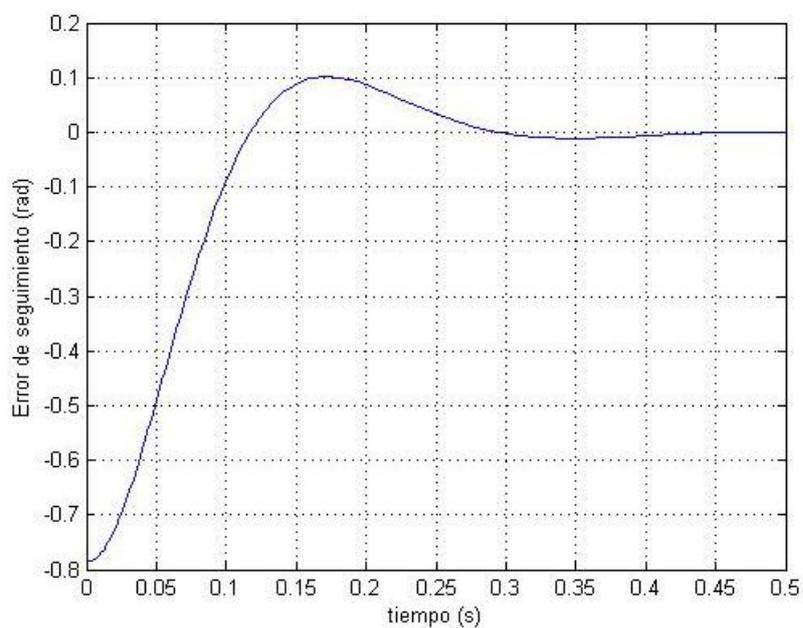


Figura 4.9 – Error de seguimiento para módulo 1 caso 2, mitad de carga.

Para el gráfico presente en la Figura 4.9 se observa un sobre pico de 0,10 rad a los 0,153 segundos de comenzada la simulación. El aumento de peso consiguió un sobre pico de menor desviación referido al caso de simulación sin cargar en el módulo y en un tiempo inferior. Al módulo en este caso le lleva 0,44 segundos en posicionarse en su punto consigna de ángulo 0 rad, nuevamente un tiempo menor que el obtenido en el caso anterior.

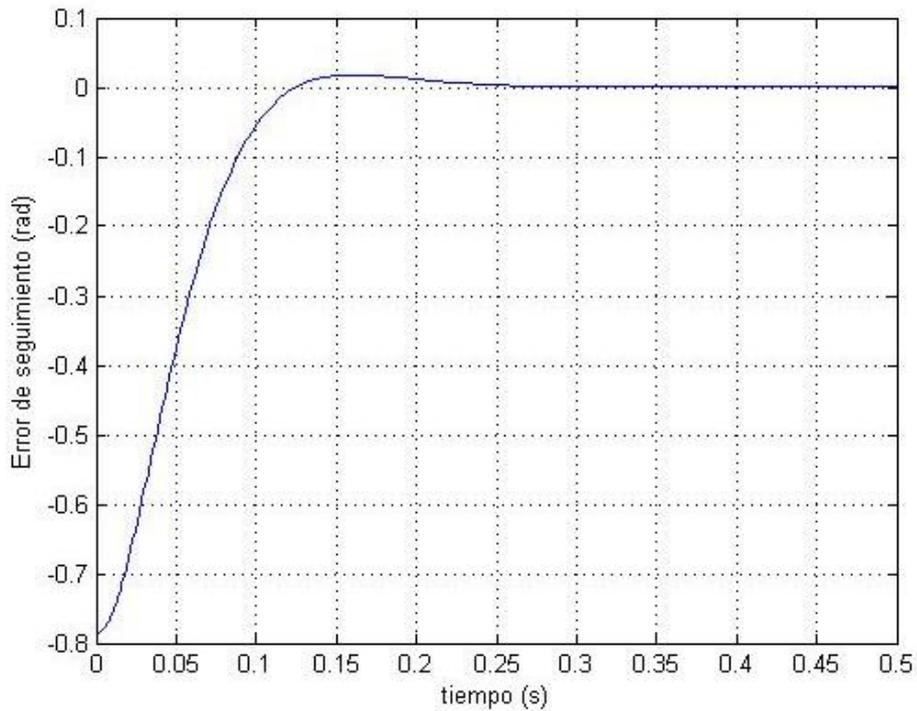


Figura 4.10 – Error de seguimiento para módulo 1 caso 3, plena carga.

Para el último gráfico presente en la Figura 4.9 se observa un leve sobre pico de 0,02 rad a los 0,15 segundos de comenzada la simulación. La carga completa consiguió un posicionamiento casi directo del módulo sobre la posición deseada. Al módulo en este caso le lleva 0,25 segundos en posicionarse en su punto consigna de ángulo 0 rad, la mitad del tiempo en el caso anterior.

Ahora se procede a realizar las mismas observaciones en los mismos tres casos en el módulo 2 de la plataforma móvil, donde se registró en principio el error de seguimiento en función del tiempo.

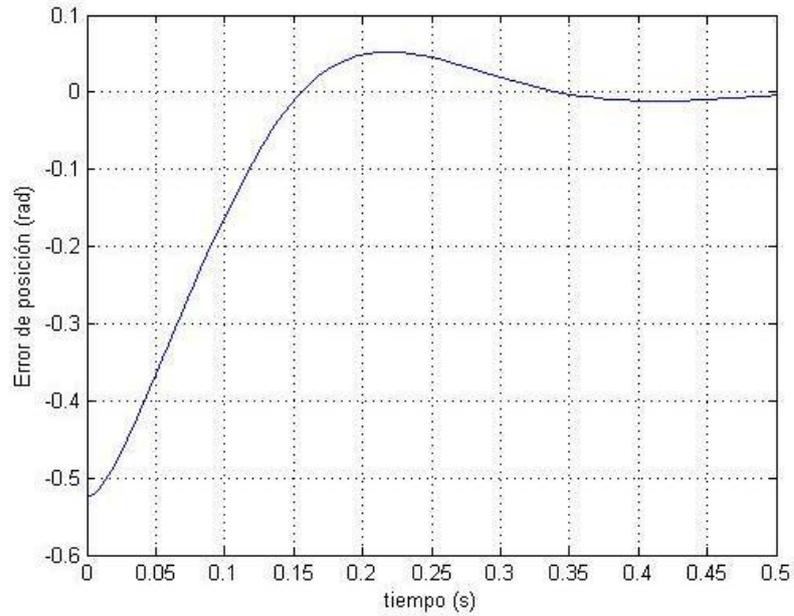


Figura 4.11 – Error de seguimiento para móvil 2 caso 1, sin carga.

Para el gráfico presente en la Figura 4.11 se observa un sobre pico de 0,05 rad a los 0,22 segundos de comenzada la simulación. Pico que se presenta retrasado frente al módulo 1. Al módulo 2, en este caso le lleva al igual que en la Figura 4.8, mas de 0,5 segundos en posicionarse en su punto consigna de ángulo 0 rad.

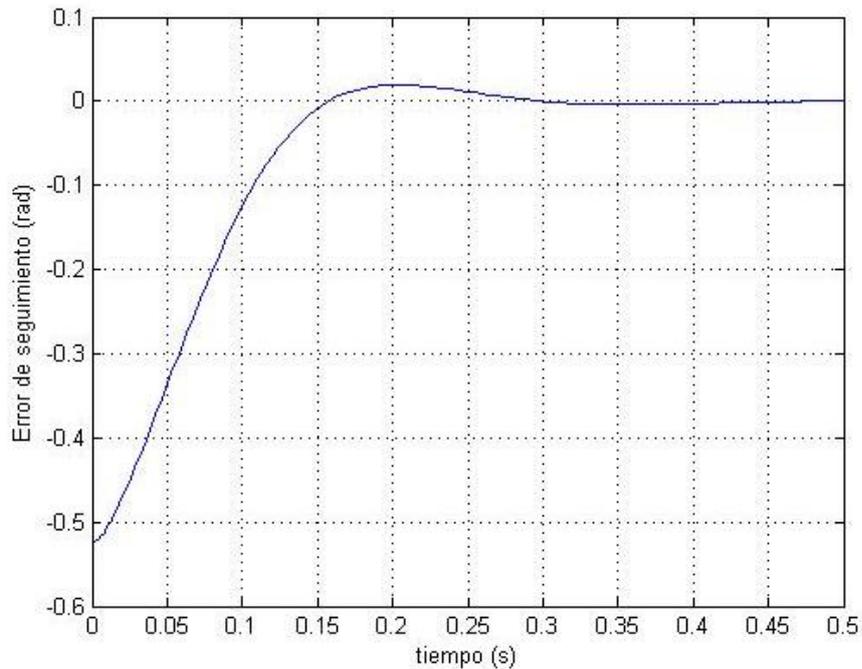


Figura 4.12 – Error de seguimiento para módulo 2 caso 2, mitad de carga.

Para el gráfico presente en la Figura 4.12 se observa un sobre pico de 0,02 rad a los 0,2 segundos de comenzada la simulación. Nuevamente el aumento de peso consiguió un sobre pico de menor desviación referido al caso de simulación sin cargar el módulo y en un tiempo inferior. Al módulo en este caso le lleva 0,47 segundos en posicionarse en su punto consigna de ángulo 0 rad, nuevamente un tiempo menor que el obtenido en el caso anterior pero superior al tiempo para el caso del módulo 1 en la misma situación.

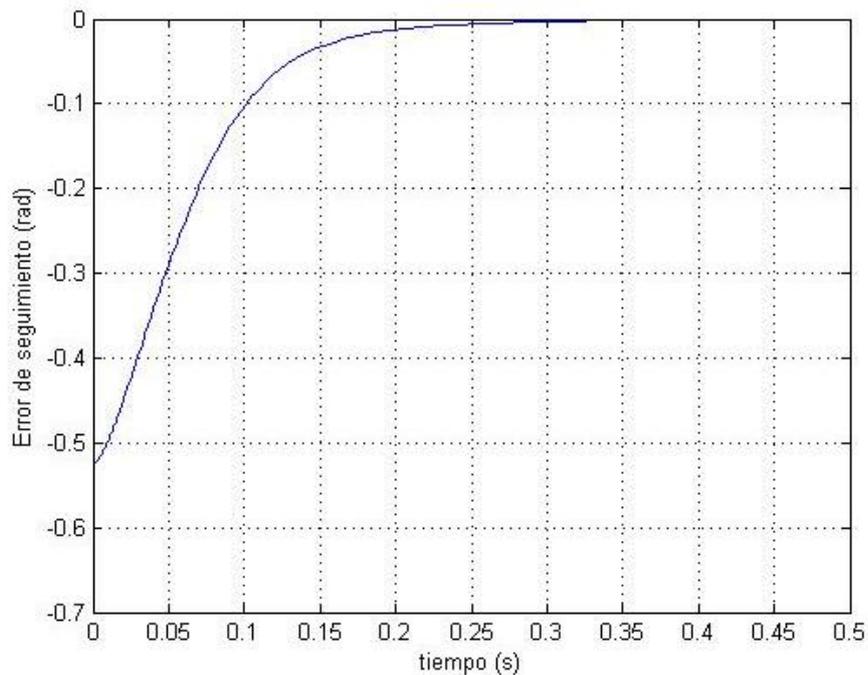


Figura 4.13 – Error de seguimiento para módulo 2 caso 3, plena carga.

En este último caso presente en la Figura 4.13 no se presentan sobre picos, Se consigue un posicionamiento directo del módulo a diferencia del otro tráiler. Al módulo en este caso le lleva 0,27 segundos en posicionarse en su punto consigna de ángulo 0 rad, a pesar de llegar de manera más directa a la posición consigna demora algunas centésimas mas que el módulo 1 en la misma situación de carga.

A continuación se presenta la revisión de los mismos 3 casos pero graficando el par necesario en cada una de las plataformas. Los primeros tres gráficos presentados se corresponden con el módulo 1.

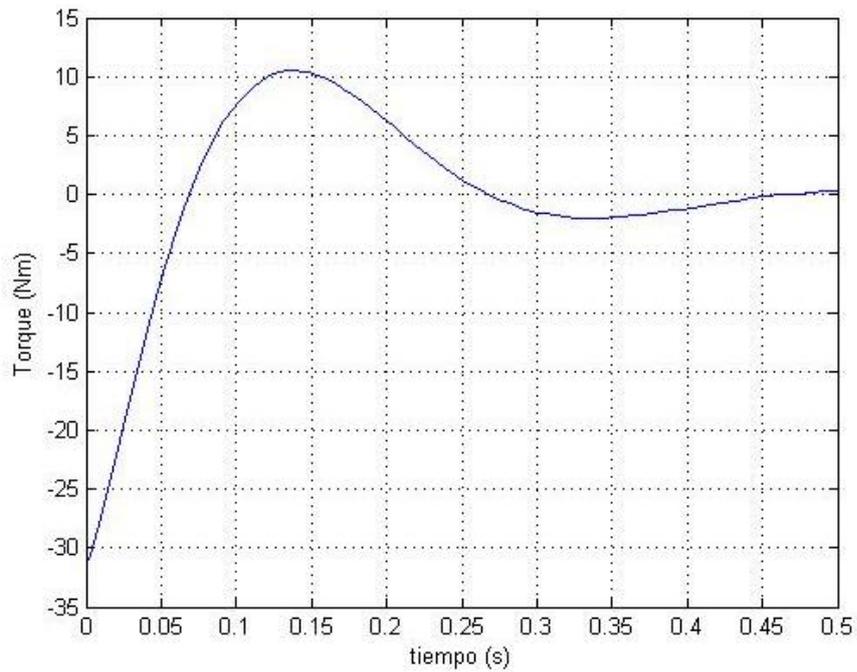


Figura 4.14 – Torque necesario en módulo 1 para el caso 1.

Para la figura 4.14 se puede observar como varía el torque necesario en el módulo 1 en función del tiempo mientras el tráiler se posiciona según el error indicado en la Figura 4.8. En este caso se tiene un torque máximo entregado al comienzo con un sobre pico de 11 Nm a los 0,13 segundos.

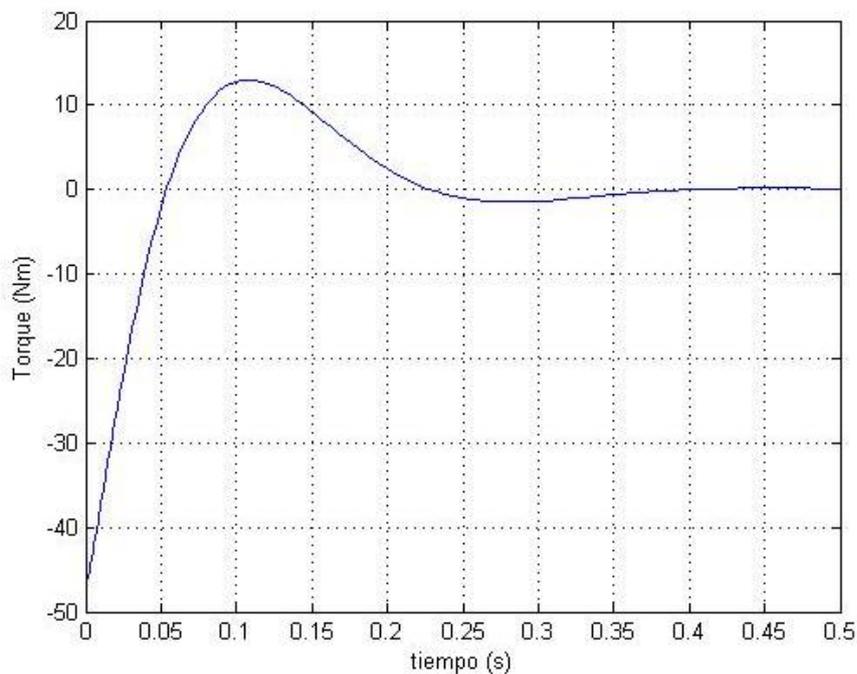


Figura 4.15 – Torque necesario en módulo 1 para el caso 2.

Ahora para la figura 4.15 se observa como varía el torque necesario para el segundo caso de simulación a media carga. En este caso se tiene un torque máximo entregado con un sobre pico de 12 Nm, un par superior al presente en la Figura 4.14, a un tiempo de 0,11 segundos. Se reconoce un par cero desde que el móvil se encuentra ubicado con su error de posición en cero lo que indica que el vehículo está ubicado en el punto consigna.

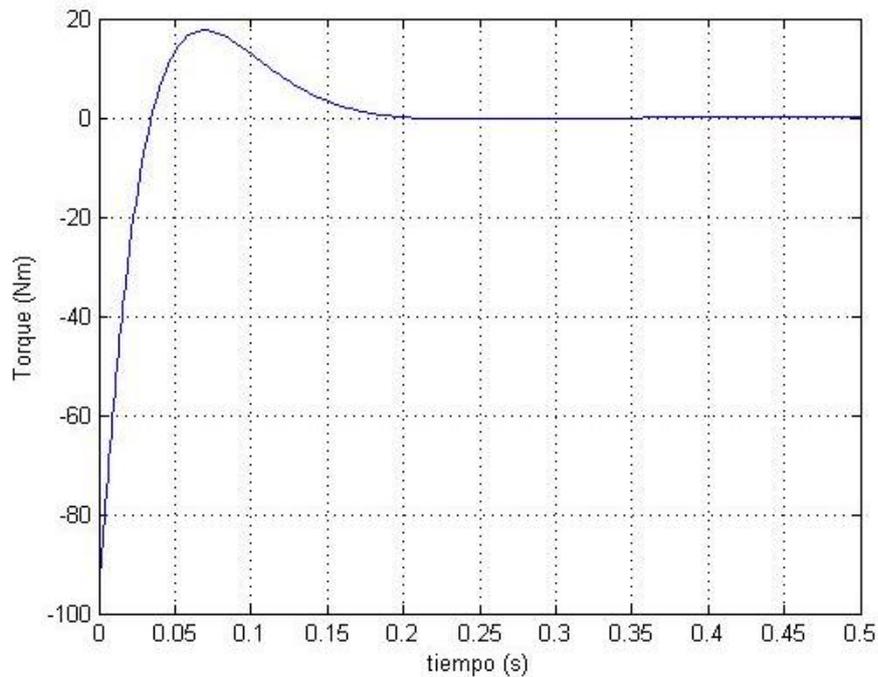


Figura 4.16 – Torque necesario en módulo 1 para el caso 3.

En la figura 4.16 se observa como varía el torque necesario para el último caso de simulación a plena carga. En este caso se tiene un torque máximo entregado con un sobre pico de 18 Nm, un par superior al presente en la Figura 4.15. En este caso el vehículo se posiciona más rápido pero necesitando un par superior. El pico se presenta en un tiempo de 0,07 segundos.

Los últimos 3 gráficos de esta sección se aprecian a continuación, se trata de la revisión de los 3 casos graficando el par necesario en el módulo 2.

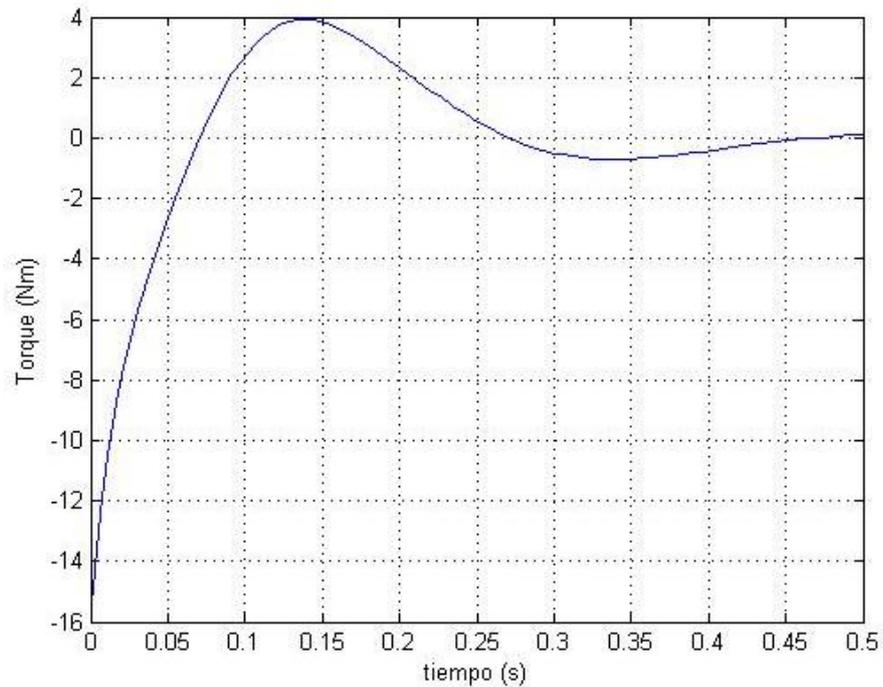


Figura 4.17 – Torque necesario en módulo 2 para el caso 1.

Para la figura 4.17 se puede observar como varía el torque necesario en el módulo 2 en función del tiempo. En este caso se tiene un torque máximo de 4 Nm, valor inferior al presente en el módulo 1. Este sobre pico se presenta a los 0,14 segundos.

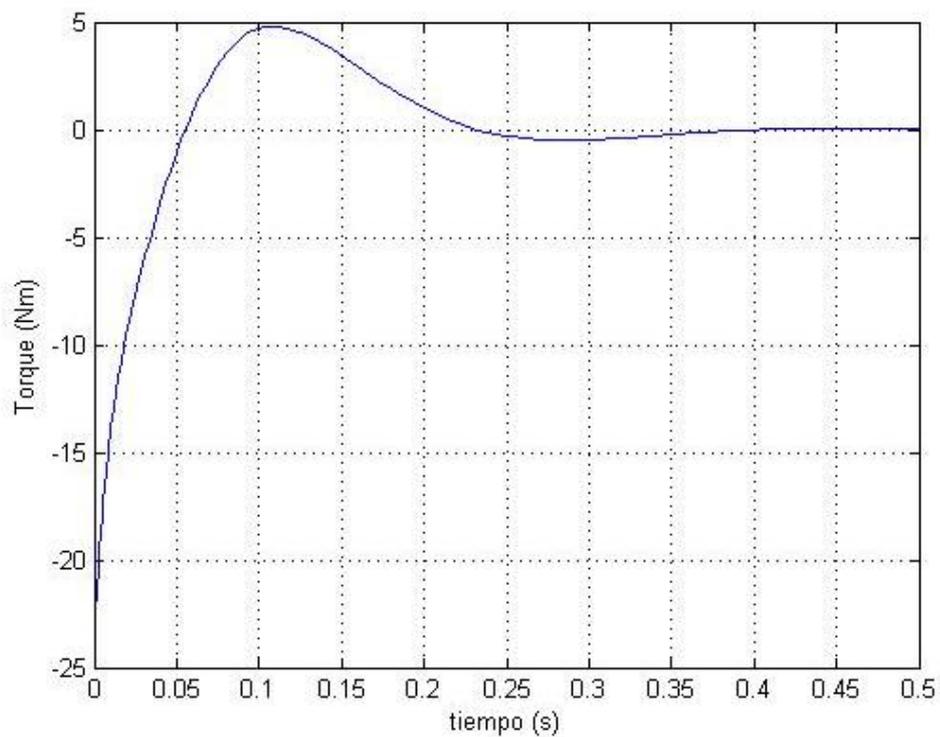


Figura 4.18 – Torque necesario en módulo 2 para el caso 2.

Ahora para la Figura 4.18 se presenta como varía el torque necesario para el segundo caso de simulación a media carga. En este caso se tiene un torque máximo entregado de casi 5Nm, a un tiempo de 0,11 segundos. Este par es superior al del caso presente en la Figura 4.17, condición que mantiene igual al módulo 1.

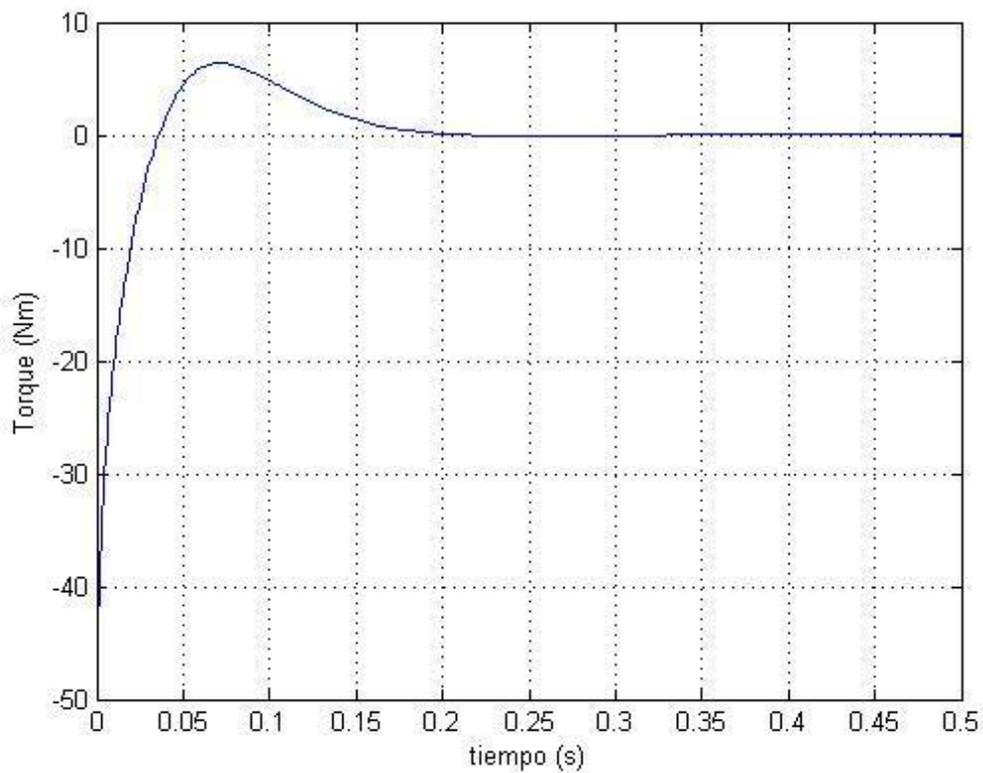


Figura 4.19 – Torque necesario en módulo 2 para el caso 3.

La figura 4.19 observa el último caso de simulación a plena carga para la plataforma 2. En este caso se tiene un torque máximo entregado con un sobre pico de 7 Nm, un par superior al presente en la Figura 4.18 pero inferior al obtenido en la otra plataforma en la Figura.4.16. Este valor se observa a los 0,06 segundos.

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados comentados a modo de comparación.

Tabla 4.2 - Resultados simulaciones caso 1, caso 2 y caso 3.

| | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Sobrepico de error de seguimiento módulo 1 | 0,17 rad | 0,10 rad | 0,02 rad |
| Tiempo del sobrepico | 0,159 s | 0,153 s | 0,150s |
| Sobrepico de error de seguimiento módulo 2 | 0,05 rad | 0,02 rad | 0 rad |
| Tiempo del sobrepico | 0,22 s | 0,20 s | |
| Sobrepico de torque en módulo 1 | 11 Nm | 12 Nm | 18 Nm |
| | 0,13 s | 0,11 s | 0,07 s |
| Sobrepico en torque en módulo 2 | 4 Nm | 5 Nm | 7 Nm |
| | 0,14 s | 0,11 s | 0,06 s |

En este momento terminan las simulaciones variando la carga de la plataforma. Son muchas las combinaciones de parámetros a modificar y simulaciones a realizar. Lo destacables es que en estos 3 casos de simulación el sistema se presento estable convergiendo en un tiempo finito al resultado deseado.

Como modificación a incluir en el sistema de control, para ver variaciones posibles en el control o par necesario a entregar, se decide incluir el modelo de fricción presentado en la sección 2.1.5 aplicado a la única articulación de la plataforma móvil, Figura 3.3. Previo a este estudio se deben determinar los coeficientes de fricción presentados en la Ecuación (2.21) para este caso y así implementarlo en el modelado.

4.2.3 Determinación de la ley de fricción en la articulación

La Ecuación (2.21) presenta el par extra necesario que entregue el motor para compensar la fricción presente en la junta. Solo se considerará esta fricción interna del vehículo por lo antes mencionado en el Capítulo 2.

Para el uso de esa ecuación, basta determinar los coeficiente de fricción de Coulomb y dinámica de la articulación. Para ambos coeficientes en el caso de juntas robóticas, hay trabajos específicos para la determinación de los mismos, la gran mayoría con enfoques experimentales.

Dado que, la construcción del modelo, su verificación experimental y validación, para la ley de fricción, es un trabajo en sí mismo; se revisa lo presentado por autores en trabajos de robótica y se escogen parámetros a modo de observar como interviene la fricción en el modelo ya presentado para la plataforma móvil. Se deciden tomar dos pares de valores de dos trabajos específicos y ver si los mismos incurren en importantes modificaciones sobre los resultados del sistema.

En este caso se tienen dos trabajos para juntas robóticas: el trabajo de Kelly et al, 1999, y el trabajo de Huang, 2001. Ambos trabajos determinan experimentalmente los coeficientes de fricción bajo el mismo modelo que utiliza este trabajo.

4.2.4 Simulación al sistema considerando fricción del motor

Los valores mencionados y presentados a continuación como caso 4 y caso 5, se incorporan en la Ecuación (2.21). Se procede a incorporar la misma en los torques aplicados al sistema, osea en el diagrama de control de la Figura 4.7. Para esta incorporación, se presume que la mitad del torque de la articulación será asumido por cada módulo. Se procede a modelar para ambos coeficientes el caso primero sin carga donde se vieron los mayores valores de error por seguimiento.

- Trabajo de Kelly et al, 1999, caso 4:

$$f_2 = 1,7 Nm$$

$$f_1 = 0,1203 Nms/rad$$

- Trabajo de Huang, 2001, caso 5:

$$f_2 = 0,5 Nm$$

$$f_1 = 0,2 Nms/rad$$

Debido a la necesidad de incorporar el torque producto de fricción en la junta, se deben incorporar elementos nuevos al lazo de control para poder operar con el signo de la velocidad relativa entre plataformas. En la siguiente figura se observa el nuevo diagrama de control.

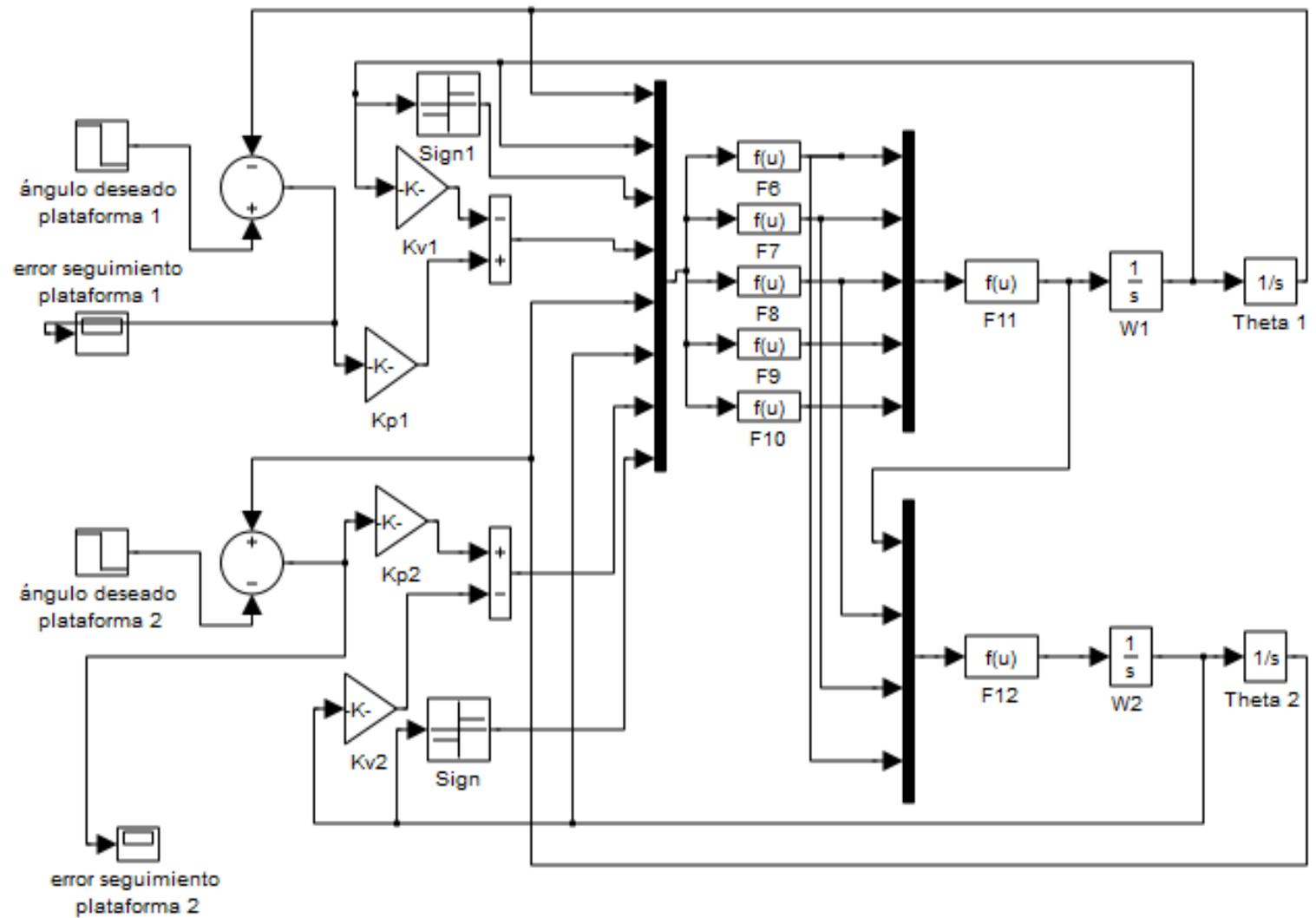


Figura 4.20 – Diagrama de Control por Torque Computado en Simulink para el vehículo móvil con fricción en junta.

Para el primer caso mencionado, caso 5, obtenido del trabajo de Kelly et al, 1999, con los valores presentados, se procede a mostrar en las figuras 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24, los resultados obtenidos. La primera figura es el error de seguimiento para el módulo 1

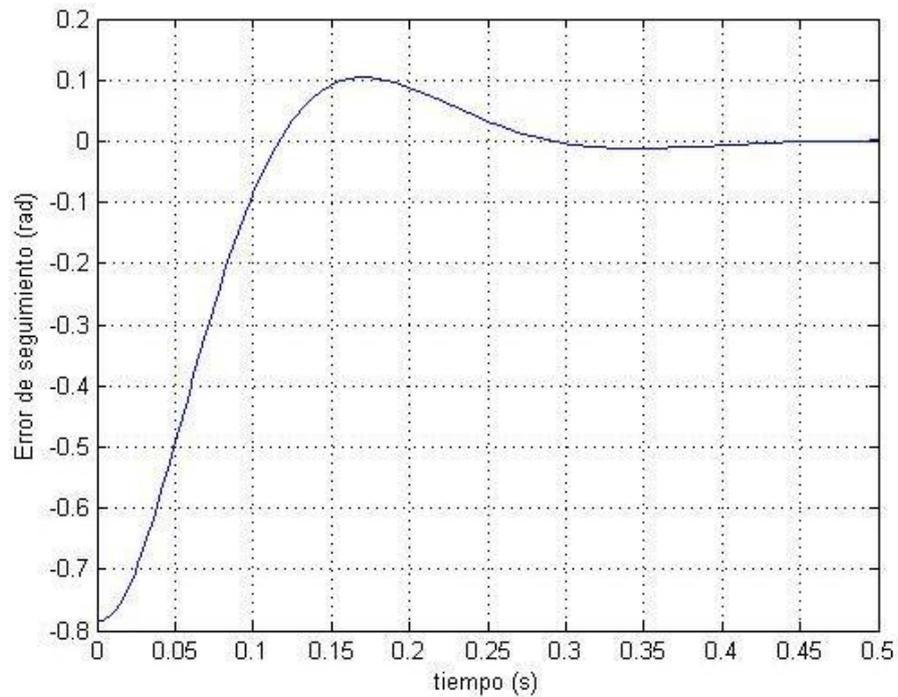


Figura 4.21 – Error de seguimiento para el módulo 1 caso 4 con fricción en articulación.

Para esta primera figura comparada con el caso de la Figura 4.8, en el cual no se tuvo en cuenta la fricción de la articulación, se observa un sobre pico de menor valor. El error fue aproximadamente de 0,1 rad menos, que en el mismo caso sin considerar esta reacción. También se alcanza el ángulo objetivo en menor tiempo para esta nueva configuración.

La siguiente es el figura que presenta el caso homologo para el módulo 2.

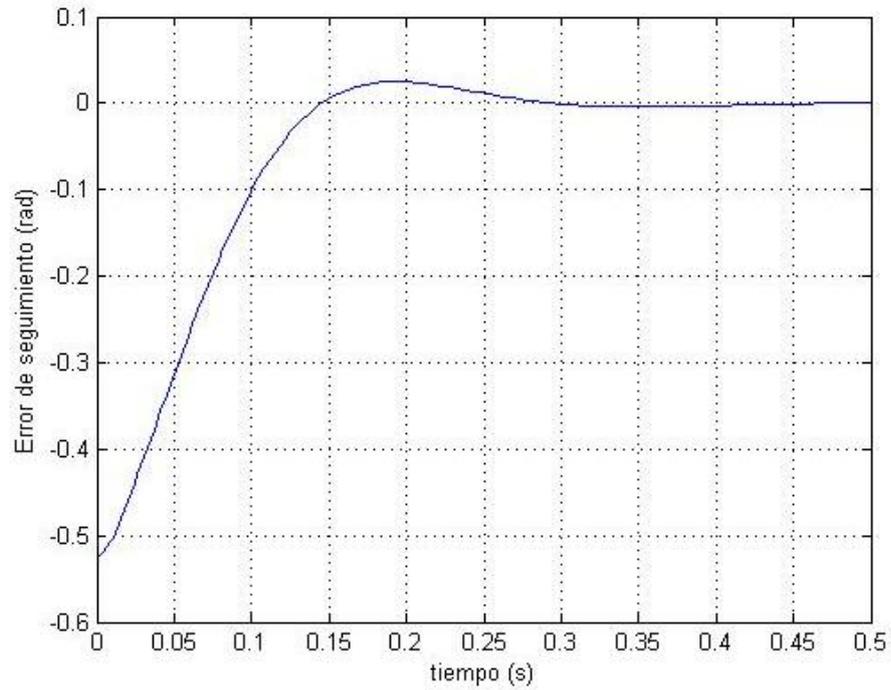


Figura 4.22 – Error de seguimiento para el módulo 2 caso 4, con fricción en articulación.

Nuevamente para esta figura, comparada con el caso en el cual no se tuvo en cuenta la fricción de la articulación, se tiene un sobre pico de menor valor, el error fue de 0,02 rad menos que en el mismo caso sin considerar esta reacción, Figura 4.11. Se baja el tiempo de asentamiento.

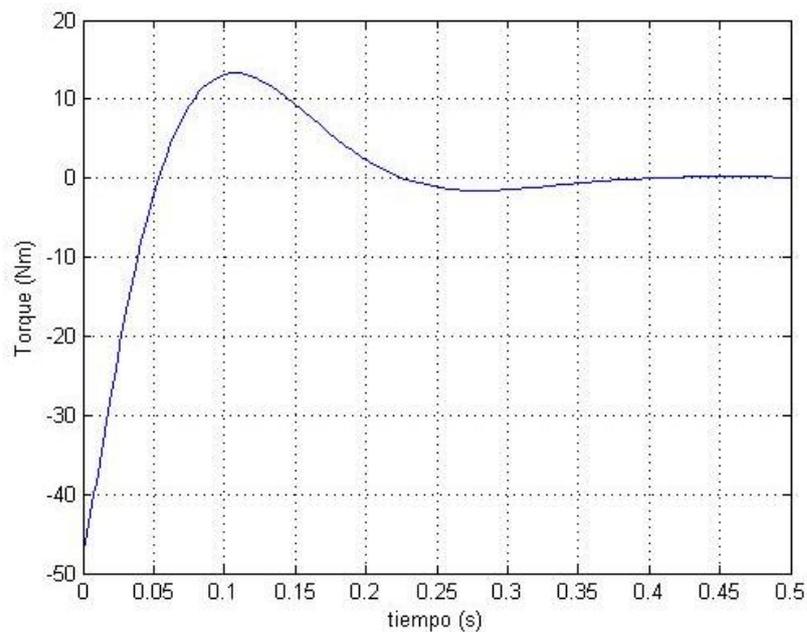


Figura 4.23 - Torque necesario en módulo 1 caso 4, con fricción en articulación.

En contrapartida a lo que sucede con el caso del error, donde el mismo decrece, el torque necesario para posicionar el módulo 1 es superior al necesario en este mismo caso sin fricción. Según la Figura 4.14, donde el torque de sobre pico tiene un valor de 11 Nm, en el caso actual presentado en la Figura 4.23 el torque de sobre pico es de casi 13 Nm. Una diferencia menor en este sentido se observa a continuación para el caso del módulo 2.

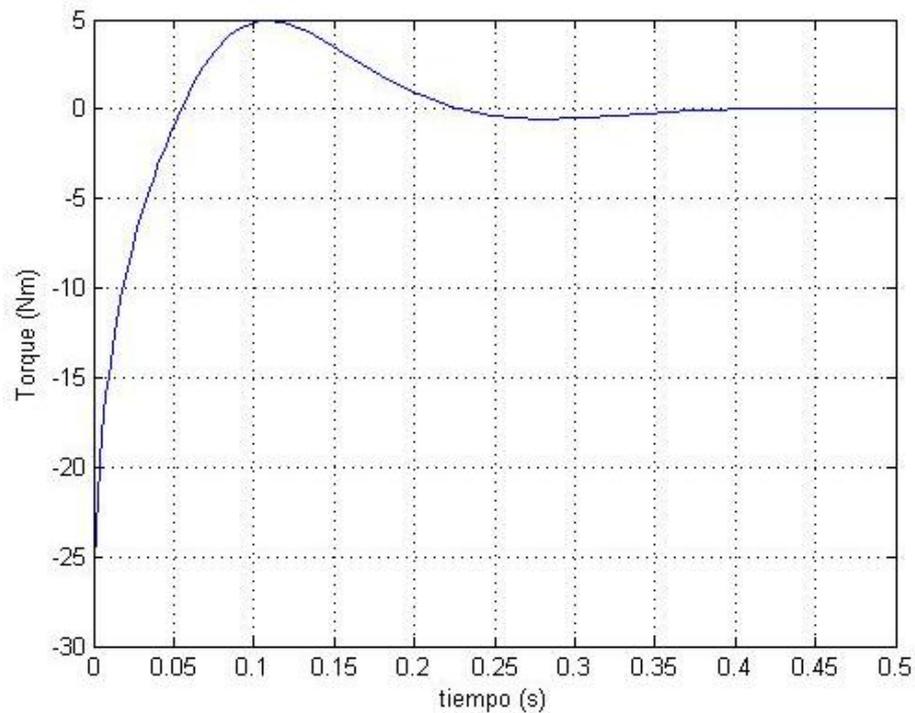


Figura 4.24 – Torque necesario en módulo 2 caso 4, con fricción en articulación.

Dado lo mencionado se procede a realizar la misma simulación pero ahora considerando los coeficientes de fricción del trabajo presentado por Huang, 2001. Para este nuevo caso se obtiene las figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28.

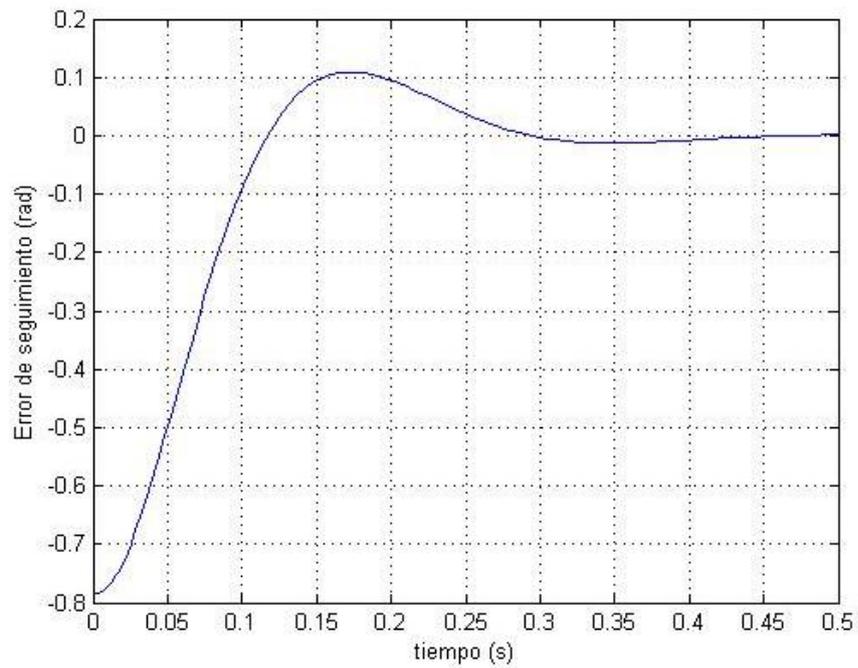


Figura 4.25 - Error de seguimiento para módulo 1 caso 5 con fricción en articulación.

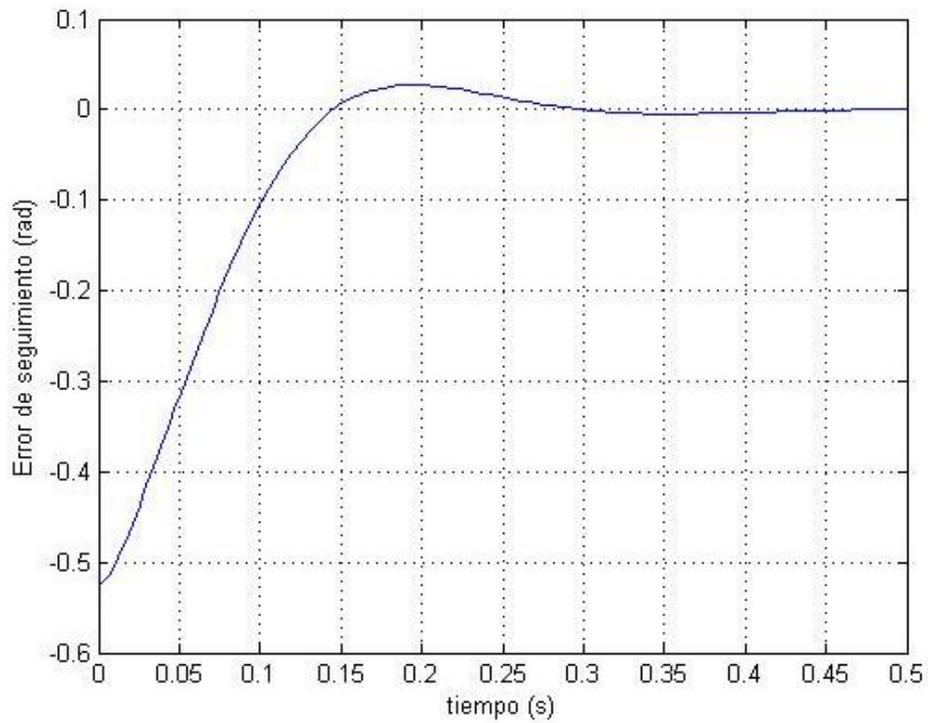


Figura 4.26 - Error de seguimiento para módulo 2 caso 5 con fricción en articulación.

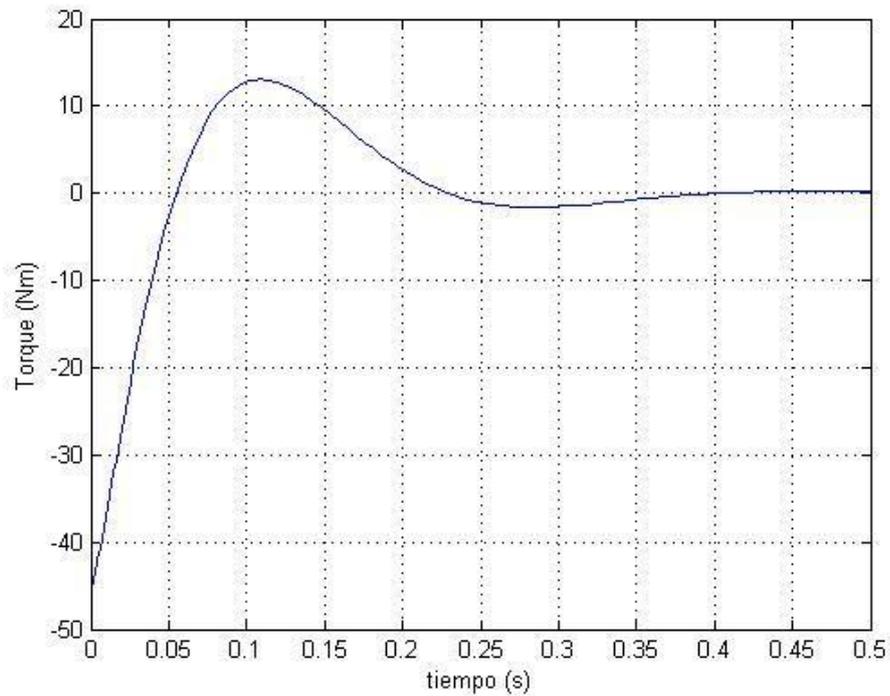


Figura 4.27 - Torque necesario en módulo 1 caso 5 con fricción en articulación.

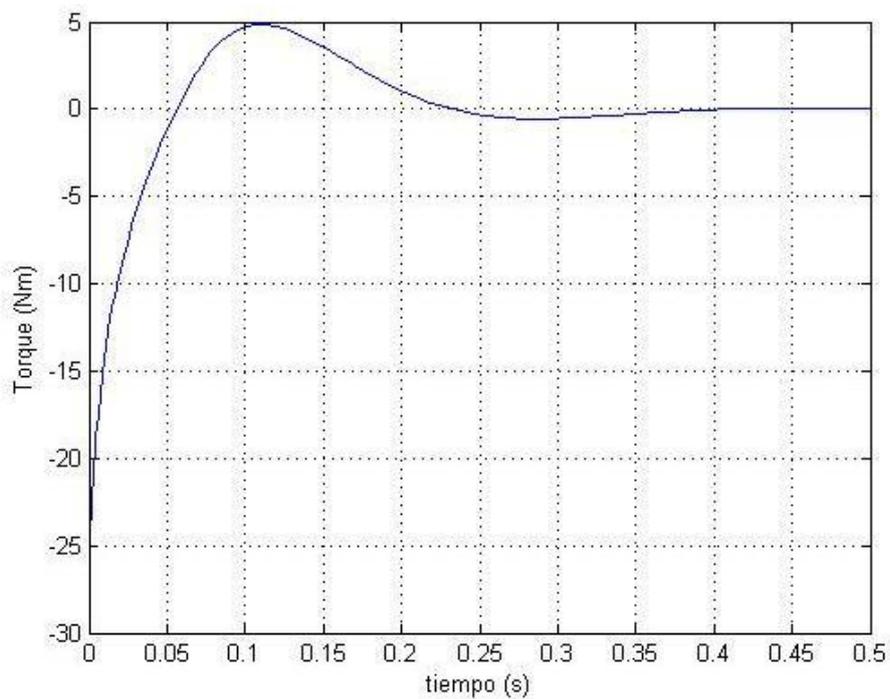


Figura 4.28 -Torque necesario en módulo 2 caso 5 con fricción en articulación.

Se observa para este caso en las 4 situaciones graficadas, no mayor diferencia con el resultado obtenido para el caso 4, la variación de coeficientes no presentó grandes perturbaciones entre los casos. Sí el hecho de tenerlos en cuenta con respecto al caso sin

fricción. La consideración de los mismos produjo mayores torques necesarios para desplazar a su posición objetivo de 0 rad cada plataforma y menores errores de seguimiento durante esta maniobra.

Nuevamente se dispone de una tabla a modo de resumen de los resultados obtenidos en estos nuevos casos de estudio.

Tabla 4.3 - Resultados simulaciones caso 4 y caso 5.

| | Caso 4 | Caso 5 |
|--|---------------|---------------|
| Sobrepico de error de seguimiento módulo 1 | 0,11 rad | 0,11 rad |
| Tiempo del sobrepico | 0,153 s | 0,153 s |
| Sobrepico de error de seguimiento módulo 2 | 0,03 rad | 0,03 rad |
| Tiempo del sobrepico | 0,158 s | 0,158 s |
| Sobrepico de torque en módulo 1 | 13 Nm | 13 Nm |
| | 0,11 s | 0,11 s |
| Sobrepico en torque en módulo 2 | 5 Nm | 5 Nm |
| | 0,11 s | 0,11 s |

Cabe recordar que estos torques son los necesarios como resultante a cada plataforma móvil producto de las fuerzas resultantes de la acción de los motores en cada rueda como se puede apreciar en la Figura 4.5. Basta aplicar las ecuaciones (4.7) y (4.8) para determinar estas fuerzas o sus diferencias y así conseguir el par o potencia a generar en los motores. Es en este último tramo de razonamiento que queda sin efecto lo planteado en la sección 2.1.5 de no considerar la fricción interna del motor.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo buscó desarrollar un controlador móvil para el prototipo que actualmente esta desarrollando la FING con el apoyo del INIA y lo consiguió. Se desarrolló un prototipo de sistema de control bajo la herramienta SIMULINK y se logró simular en el mismo con resultados convergentes.

El controlador desarrollado utilizó al estrategia de control por torque computado lo que permitió dar una base sólida al trabajo y partir de resultados conocidos como son el modelo utilizado para validar el controlador. Esta estrategia de control pudo ser aplicada gracias al conocimiento o estimación de las variables dinámicas, detalles que es importante para que estos controladores funcionen. Para poder acercar mejor el controlador a resultados exactos bastará acoplar a la plataforma sensores que determinen de manera precisa las variables necesarias como son la masa, las posiciones actuales del vehículo, etc e incorporar estos resultados al controlador. Por otra parte esta serie de decisiones deben venir acompañadas de un agil procesamiento de las señales.

Se consiguió observar el comportamiento frente a la consideración de fricción en la articulación con resultados no despreciables. Un trabajo en si mismo se puede realizar en esta área para modelar correctamente esta fricción y conseguir de manera adecuada las constantes que intervienen en este proceso. Sin embargo estas primeras aproximaciones presentes en este trabajo sirven para entender que no es un tema menor a despreciar. Otro detalle futuro a considerar en la articulación son los efectos del movimiento que la misma permite en torno del eje x los cuales fueron despreciados en todo el desarrollo.

Se concluye que los objetivos planteados fueron conseguidos y se deja para trabajo futuro validar experimentalmente en la plataforma el sistema de control diseñado junto con la incorporación de sensores necesarios para una mejor utilización del mismo. Desde el punto de vista analítico queda instaurar el torque diferencial, resultado de las ruedas, para obtener los torques deseados. Con el modelo implementado en la plataforma se pueden estudiar efectos de patinaje de las ruedas con condiciones límites de adherencia y maneras de evitar estos casos a modo de preservar los motores y componentes eléctricos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angel L., Hernandez C., Diaz-Quintero C., **Modeling, Simulation and Control of a Differential Steering type Mobile Robot**, 32nd Chinese Control Conference, Xi'an China, 2013.

Arranz A., Baliñas J., Bronte S., Garcia J., Gonzalez D., Gutierrez J., Llamazares A., Rojas F., Sanz V., **Aplicaciones de robots móviles**, Universidad de Alcalá, Alcalá, 2006.

Bañó A., **Análisis y Diseño del Control de Posición de un Robot Móvil con Tracción Diferencial**, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, 2003.

Cova W., Cavallero R., Olmedo S., Gonzalez G., Gutierrez F., **Motores de CC en aplicaciones de robótica – Metodología e instrumentación para la identificación de sus parámetros**, CUDAR (Centro Universitario de Desarrollo en Automación y Robótica), Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Ene 2006.

Gillespie T.D., **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, Society of Automotive Engineers, Inc., United States of America, 1992.

Godoy E. P., Tabile R. A., Pereira R. R. D., Tangerino G. T., Porto A. J. V., Inamasu R. Y., **Design and implementation of an electronic architecture for an agricultural mobile robot**, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol 14, N°11, 2010.

Hackenhaar N. M., Hackenhaar C., Viera de Abreu Y., **Robótica na agricultura**, Interações, Campo Grande, Vol. 16, N° 1, Jun 2015.

Herrera D., Tosetti S., Carelli R., **Dynamic Modeling and Identification of an Agriculture Autonomous Vehicle**, IEEE Latin America Transactions, VOL. 14, N° 6, Junio 2016.

Huang J., **An Adaptative Compensator for a Servosystem with Coulomb and Viscous Friction**, Conference on Control Applications, Mexico, Mexico City, Set 2001.

Jazar R., **Vehicle Dynamics Theory and Application**, Springer Science + Business Media, LLC, New York, 2008.

Kelly R., Llamas J., **Determination of viscous and Coulomb friction by using velocity responses to torque ramp inputs**, International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, May 1999.

Kelly R., Santibáñez V., Loría A., **Control of Robot Manipulators in Joint Space**, Springer-Verlag London Limited, 2005.

Kuo B.C., **Sistemas de Control Automático**, Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 1996.

Lewis F.L., Dawson D.M., Abdallah C.T., **Robot Manipulator Control Theory and Practice**, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.

Martín P., Hernandez O., Batista A., Bandarra E., Sales R., **Evaluación de trayectorias para un robot móvil autónomo aplicable en pequeñas y medianas producciones agrícolas**, Scientia et Technica Año XVII, N° 52, Dic 2012.

Ortega R., Spong M.W., **Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial**, Journal Automatica (Journal of IFAC), Vol 25, Issue 6, Nov 1989.

Puignau F, **Modelado dinámico de un vehículo autónomo articulado todoterreno**, UFRGS, 2017, trabajo pendiente de publicación.

Ramos E.R., Morales R., Silva R., **Modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial**, Latin American Journal of Physics Education, Vol. 4, N°3, Sept 2010.

Reyes D., **Mobile Robot Navigation Assisted by GPS**, IIEE Latin America Transactions, vol 13 n°16, jun 2015.

Sanchez S., Cabrera M., Garcia R., **Determinación de los parámetros de un motor de CD por medición física directa**, Huajuapán de León, Oaxaca, México, Oct 2014.

Siciliano B., Oussama K., **Handbook of Robotics**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.

Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G., **Robotics Modelling, Planning, and Control**, Springer-Verlag, London Limited, 2009.

Siegwart R., Nourbakhsh I., **Introduction to Autonomous Mobile Robots**, Massachusetts Institute of Technology, 2004.

Slotine J. J. E., Li W., **Adaptive Manipulator Control: A Case Study**, IEE Int. Conf, Robotics and Automation, Raleigh, NC, 1987.

Slotine J.J.E., Li W., **Applied Nonlinear Control**, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1991.

Slotine J.J.E., Li W., **On the adaptive control of robot manipulators**. Int. Journal of Robotic Research 6, 1987.

Slotine J. J. E., **Putting Physics in Control – The Example of Robotics**, IEEE Control Systems Magazine, 1988.

Stadler W, **Analytical Robotics and Mechatronics**, McGraw-Hill, New York, 1995.

Tejera G., **Robótica Agropecuaria - Sistema de navegación aplicado a un robot sembrador**, Presentación de propuestas de proyectos de grado, Instituto de Computación de Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Montevideo, 2014.

Torres J., Viáfara R., Martínez F., **Procesamiento de imágenes para la planeación de rutas para robots móviles**, Redes de Ingeniería, Revista vol 5 n°2, Colombia, 2014.

Torres M., Moreno V., **Un Nuevo método de generación de caminos para robots móviles mediante curvas clotoides**, RIELAC – Revista de Ingeniería Electronica, Automática y Comunicaciones, feb 2015.