



UNIVERSIDADE DA CORUÑA
ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR

Aplicación dun simulador de condución para o deseño de condutores virtuais

Alumno: Manuel Carro Moreira

Titores: Miguel Ángel Naya Villaverde / Francisco Javier González Varela

Ferrol, Xullo 2016

Agradecementos

O meu agradecemento diríxese en primeiro lugar a Francisco Javier González Varela e a Miguel Ángel Naya Villaverde, polo seu labor persoal de dirección deste proxecto, apoiando e aconsellando coa súa experiencia para a mellora da calidade do mesmo.

Tamén quero agradecer a tódolos compoñentes do *Laboratorio de Ingeniería Mecánica*, pola súa axuda e o tempo que me dedicaron.

Ao *Laboratorio de Ingeniería Mecánica* da Universidade da Coruña, por permitirme realizar o proxecto nas súas instalacións.

Finalmente, e non menos importante, quero agradecer de maneira moi especial a toda a miña familia por todas as axudas e os ánimos que me deron ao longo dos estudos realizados na Escola Politécnica Superior da UDC, en especial a meus pais, a meus irmáns, a meus avós, á miña parella e amigos.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	9
1.1	Introdución	9
1.2	Motivación	9
1.3	Estado da arte	10
1.3.1	Introdución	10
1.3.2	Principais Proxectos ITS.....	11
1.3.3	Vehículos Intelixentes	14
1.3.4	Esquemas de Control para a Automatización.	21
1.4	Obxectivos	24
2.	SISTEMAS DE CONTROL EMPREGADOS	25
2.1	Definición	25
2.2	Sistema de control de lazo aberto y lazo pechado	26
2.2.1	Introdución	26
2.2.2	Lazo aberto.....	26
2.2.3	Lazo pechado.....	27
2.3	Controlador PID	28
2.3.1	Introdución.....	28
2.3.2	Funcionamento	29
2.3.3	Axuste do PID	31
2.4	Lóxica difusa (Fuzzy Logic)	33
2.4.1	Introdución.....	33
2.4.2	Funcionamento	33
3.	O PROTOTIPO	41
3.1	O prototipo real	41
3.2	O modelo virtual do prototipo real	43
4.	SIMULACIÓNS E RESULTADOS	46
4.1	Introdución	46
4.2	Desenvolvemento do programa	47
4.3	Liña recta	48
4.3.1	Control proporcional	49
4.3.2	Control proporcional-derivativo.....	50
4.4	Elipse	51

4.4.1	Descrición	51
4.4.2	Control proporcional	52
4.4.3	Control proporcional-derivativo.....	53
4.4.4	Control proporcional-integral-derivativo	54
4.4.5	Control Fuzzy	56
4.5	O circuíto	61
4.5.1	Descrición	61
4.5.2	Traxectoria a seguir: Curvas de Bézier	63
4.5.3	Definición e cálculo do “erro”	65
4.5.4	Controlador PID.....	66
4.5.5	Controlador Fuzzy	68
4.6	Simulador LIM.....	68
4.6.1	Descrición	68
4.6.2	O simulador	69
4.6.3	O erro de posición e o erro angular	69
4.6.4	Simulacións.....	70
4.6.5	Controlador PID.....	70
4.6.6	Controlador FUZZY	78
4.6.7	Comparación dos controladores	87
4.6.8	Comparación entre o condutor virtual e un condutor humano.....	89
5.	CONCLUSIÓNS	91
5.1	Conclusións.....	91
5.2	Traballo futuro.....	93
6.	BIBLIOGRAFÍA	94

Imaxe 1 Sistemas de balizas por infravermellos e microondas	13
Imaxe 2 Vehículos desenvolvidos no proxecto Navlab.....	16
Imaxe 3 Vehículo autónomo ARGO.....	17
Imaxe 4 Esquema de actuación para o control da dirección proposto por Shimakage.....	23
Imaxe 5 Esquema xeral dun sistema de control	25
Imaxe 6 Esquema dun sistema de control de lazo aberto	26
Imaxe 7 Esquema dun sistema de control de lazo aberto	27
Imaxe 8 Lazo de control de un PID.....	28
Imaxe 9 Esquema de funcionamento dun controlador borroso	34
Imaxe 10 Proceso de funcionamento de un controlador borroso	35
Imaxe 11 Conxunto borroso da entrada de datos do controlador	36
Imaxe 12 Conxunto borroso da saída de datos do controlador	36
Imaxe 13 Grao de pertenza en función do valor de entrada	37
Imaxe 14 Valor da actuación en función do grao de pertenza	38
Imaxe 15 Grao de pertenza en función do valor de entrada	39
Imaxe 16 Valor da actuación en función do grao de pertenza	40
Imaxe 17 O prototipo real.....	41
Imaxe 18 Esquema do modelo virtual do prototipo.....	45
Imaxe 19 Traxectoria descrita por unha masa puntual ao longo dunha simulación.....	48
Imaxe 20 Traxectoria do sólido ao longo da simulación fronte á traxectoria a seguir cun controlador P	49
Imaxe 21 Traxectoria do sólido ao longo da simulación fronte á traxectoria a seguir cun controlador PD	50
Imaxe 22 Representación das variables para a descrición do erro no sistema	52

Imaxe 23 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador P	53
Imaxe 24 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador PD.....	54
Imaxe 25 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador PID.....	55
Imaxe 26 Erro do sólido ao longo da simulación	55
Imaxe 27 Conxunto borroso para a entrada do erro.....	57
Imaxe 28 Conxunto borroso para a entrada da derivada do erro	58
Imaxe 29 Conxunto borroso para a saída o controlador.....	59
Imaxe 30 Regras do control borroso	60
Imaxe 31 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador Fuzzy	60
Imaxe 32 Erro do sólido ao longo da simulación	61
Imaxe 33 Debuxo esquemático do Circuito de Cataluña.....	62
Imaxe 34 Curvas de Bézier e puntos de control	63
Imaxe 35 Polinomios de Bernstein.....	64
Imaxe 36 Intersección da normal ao vehículo coa curva obxectivo	65
Imaxe 37 Erro do sólido ao longo da simulación co controlador PID	67
Imaxe 38 Erro do sólido ao longo da simulación co controlador borroso	67
Imaxe 39 Representación do erro en posición e do erro en ángulo dun vehículo coa traxectoria	70
Imaxe 40 Erro máximo no circuito según a magnitude da ganancia	71
Imaxe 41 Erro de posición do controlador PD fronte ao orixinal	72
Imaxe 42 Erro de posición do controlador PID fronte ao orixinal	73
Imaxe 43 Erro de posición do controlador PID+P fronte ao orixinal	74

Imaxe 44 Erro de posición do controlador PID+PD fronte o orixinal	75
Imaxe 45 Esquema da planta do vehículo para o cálculo da relación entre xiro do volante e radio de xiro.....	76
Imaxe 46 Cálculo da curvatura que se consegue en función do ángulo do volante	77
Imaxe 47 Erro de posición do controlador PID + P + FFW fronte ao orixinal	78
Imaxe 48 Conxunto borroso da entrada do controlador	79
Imaxe 49 Conxunto borroso da saída do controlador	80
Imaxe 50 Xestión de regras do controlador	81
Imaxe 51 Superficie de control xerada polas regras de actuación sobre o volante	82
Imaxe 52 Superficie de control xerada polas regras de actuación sobre o volante	83
Imaxe 53 Erro de posición do controlador Fuzzy 1 fronte ao orixinal	83
Imaxe 54 Conxuntos borrosos para o erro en posición	84
Imaxe 55 Conxuntos borrosos para o erro en ángulo.....	85
Imaxe 56 Conxuntos borrosos para o xiro do volante	86
Imaxe 57 Superficie de control xerada polas regras de actuación sobre o volante	86
Imaxe 58 Erro de posición do controlador Fuzzy 2 fronte ao orixinal	87
Imaxe 59 Erro de posición para os distintos controladores	88
Imaxe 60 Erro de posición do controlador PID + P + FFW fronte a un condutor humano	90

Táboa 1 Axuste dun controlador mediante o método Ziegler-Nichols	32
Táboa 2 Grao de pertenza dos conxuntos borrosos da entrada ao control	37
Táboa 3 Grao de pertenza dos conxuntos borrosos da saída do control.....	38
Táboa 4 Grado de pertenza dos conxuntos borrosos da entrada ao control	39
Táboa 5 Grado de pertenza de los conxuntos borrosos de la saída del control	39
Táboa 6 Coordenadas do centro de gravidade e inercias dos elementos principais.	43
Táboa 7 Resultados obtidos do controlador PD	72
Táboa 8 Resultados obtidos do controlador PID	73
Táboa 9 Resultados obtidos do controlador PID + P.....	74
Táboa 10 Resultados obtidos do controlador PID + PD	75
Táboa 11 Resultados obtidos do controlador PID + P + FFW.....	78
Táboa 12 Resultados obtidos do controlador Fuzzy 1.....	84
Táboa 13 Resultados obtidos do controlador Fuzzy 2.....	87
Táboa 14 Comparación de todos os controladores desenvolvidos	88
Táboa 15 Resultados obtidos co aumento da velocidade máxima do vehículo.....	89
Táboa 16 Comparación de un condutor humano fronte a un controlador virtual “PID + P + FFW”	90

1. Introducción

1.1 Introducción

Moitos condutores temos asentido algunha vez cun sorriso á coñecida pregunta dunha marca de automóbiles coa que rematan moitos dos seus anuncios publicitarios: Gústache conducir? Pero non todo o mundo cre que conducir supón un pracer, senón máis ben o contrario. Hai quen pensa que perder tempo a diario nun vehículo por motivos de traballo ou para atender outras obrigacións é unha perda de tempo grande, sobre todo en cidades grandes con importantes problemas de tráfico en hora punta. Atascos, problemas de aparcamento, son algúns dos inconvenientes para milleiros de usuarios que utilizan o seu vehículo particular de forma diaria.

Neste sentido, a industria do automóbil está centrando todos os seus esforzos en converter o acto da conducción nun pracer, apostando pola tecnoloxía para fabricar coches cada vez máis seguros, autónomos e intelixentes. Luces que se acenden de forma automática, limpa parabrisas que se activan con sensores de choiva, sistemas de aparcamento automático, lectores de sinais, etc. Aplicacións que permiten ao usuario centrar a súa atención na estrada nos desprazamentos habituais, pero que en calquera caso non resolven a problemática do tempo investido na conducción pola gran cidade e a falta de concentración por axentes externos.

Xa que logo, non é de estrañar que o paso lóxico na evolución da industria automobilística sexa a aposta por tecnoloxías orientadas cara a sistemas de conducción autónoma. Sistemas onde o coche é quen se controla a si mesmo, relegando ao condutor a un segundo plano. É dicir, a interacción entre o usuario e o coche limitase a sentarse no asento e indicar o punto de destino e a hora de chegada.

1.2 Motivación

Na actualidade búscase unha mellora constante dos sistemas de control na automatización de vehículos, que conleve o aumento da seguridade para os pasaxeiros ou para terceiros, o aumento do confort durante un traxecto, a diminución de concentracións altas de vehículos en determinadas cidades ou a diminución de consumos e emisións, entre outros.

O emprego da simulación no presente traballo axúdanos a entender os sistemas que analizamos, neste caso os sistemas de control que poidan actuar nun vehículo para a súa conducción autónoma, comprobalos e desenvovelos antes da súa implementación na realidade, para reducir o tempo de investigación e reducir tamén así os seus custos.

Todo este conxunto serviu como motivación para o desenvolvemento deste traballo, no

que se dá solución a moitos destes problemas, directamente a uns e indirectamente a outros.

1.3 Estado da arte

1.3.1 Introducción

O control e a automatización dun vehículo automóbil abarcan diversos ámbitos, como son todos os relativos ás técnicas de control e automatización de manobras, a instrumentación do vehículo e da estrada, e a modelización do vehículo. Así mesmo, os enfoques deste mesmo problema son variados (seguridade vial, asistencia á condución, etc.) e proveñen tanto de institucións públicas como privadas, con estratexias variadas e intereses diversos. Por este motivo, a información atópase moi dispersa e resulta difícil chegar a unha síntese clarificadora dos avances que se produciron neste campo.

Neste apartado sobre o estado da arte, en primeiro lugar faise un repaso da evolución da automatización dos automóviles. A continuación, descríbense os principais programas internacionais relacionados con este traballo. Seguidamente, baixo o epígrafe de Vehículos Intelixentes, expóñense os principais sistemas de control de vehículos desenvolvidos e, no seguinte apartado, detállanse as técnicas de control aplicadas.

Os principais obxectivos da investigación neste campo son: mellorar a seguridade, incrementar a capacidade de tráfico en estrada, reducir o consumo de combustible, e aumentar o confort e a manexabilidade por parte do condutor. Unha maior automatización do vehículo descarga ao condutor de moitas das operacións rutineiras englobadas na condución e reduce a probabilidade de fallos humanos. Ao mesmo tempo, ao aumentar o número de vehículos nas estradas, xorde unha nova problemática, que é a capacidade das vías. Como solución para todos estes fenómenos propúxose, entre outras solucións, o desenvolvemento dun tipo de automatización que axude a incrementar o fluxo de tráfico de xeito seguro. Ademais, unha circulación dos vehículos menos brusca, guiada mediante un sistema automatizado, pode reducir o consumo de combustible e o desgaste do motor.

Tendo presentes todos os beneficios anteriormente mencionados, a investigación para automatizar todos ou algúns dos aspectos incluídos na condución desenvolveuse fai xa varias décadas. No entanto, durante boa parte do século XX, a electrónica e a tecnoloxía dos sensores eran aínda moi rudimentarias, e iso supuxo un freo para o desenvolvemento e a aplicación destas investigacións.

Pódese dicir que a automatización comeza cara a 1930, pero non é ata finais dos anos 80 e comezos dos 90 cando aparecen programas, tanto estatais como privados, especialmente en Estados Unidos, Europa e Xapón, coa idea de facer realidade sistemas

de transporte intelixente ou automatizado. O principal interese residía en aumentar a capacidade das estradas e a seguridade mediante a automatización, tanto a nivel de infraestruturas como de vehículos. A investigación desenvolvida durante esta época estaba moi ben organizada -aínda que, en ocasións, resultase un tanto futurista- e contribuíu, xunto cos rápidos avances en electrónica e tecnoloxía dos sensores, a unha mellor comprensión das dificultades e das potencialidades destes sistemas. Inicialmente, a investigación centrouse máis no desenvolvemento de Sistemas Avanzados de Estradas (Advanced Highway Systems, AHS) e, posteriormente, o interese pasou á denominada Iniciativa en Vehículos Intelixentes (Intelligent Vehicle Initiative, IVI); toda a investigación desenvolvida na etapa inicial sobre AHS constituíu unha boa base para a aplicación en sistemas IVI. Todo o conxunto desta investigación, tanto a relativa ao equipamento e automatización dos vehículos, como a mellora e a dotación de instrumentos de información nas infraestruturas, agrúpase no concepto denominado Sistemas de Transporte Intelixente (Intelligent Transportation Systems, ITS).

Nestes momentos, ao comezar o século XXI, algúns fabricantes introduciron xa nos seus vehículos o Control Adaptativo de Cruceiro (ACC), e outros moitos esméranse por introducir tanto ACC como outros sistemas avanzados, como a detección e elusión de colisións. Moitos sistemas que no pasado parecían elucubracións futuristas son xa realidade, pero quedan aínda por resolver moitas cuestións antes de poder introducir amplamente os sistemas de asistencia para a conducción. A teoría de control e as súas aplicacións atópase nun estadio avanzado, con todo a sensorización suscita aínda novos retos, e o impacto da automatización da conducción sobre o condutor necesita aínda un estudo máis detallado, de maneira que ocupa boa parte dos esforzos que se están levando a cabo actualmente. Doutra banda, realizáronse diferentes propostas para o aumento da seguridade vial, o aumento de capacidade das estradas e a mellora do confort.

1.3.2 Principais Proxectos ITS.

En Europa, a investigación sobre sistemas ITS levouse a cabo dentro dos programas DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe), e PROMETHEUS (Program for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety). O programa DRIVE estaba dedicado ao aumento da seguridade en infraestruturas, mentres que PROMETHEUS tiña como obxectivo a mellora da eficiencia no tráfico por estrada. Con todo, a cooperación entre ambos proxectos foi moi frecuente para o logro dun fin común: mellorar a seguridade na conducción.

O principal interese centrouse no desenvolvemento de equipos de axuda á navegación nos vehículos, e a súa investigación dividiuse fundamentalmente nas seguintes categorías:

- Mellora da información ao condutor, proporcionándolle novos recursos mediante o uso das novas tecnoloxías.

- Asistencia activa ao condutor, de tal xeito que cando este sexa incapaz de realizar algunha tarefa, o sistema poida proporcionarlle información, ou ben desenvolver unha actuación autónoma.
- Establecemento dunha rede de comunicacións entre vehículos, que sexa capaz de proporcionar ao condutor información sobre o estado do tráfico nalgún tramo da ruta.
- Xestión do tráfico e flotas de vehículos.

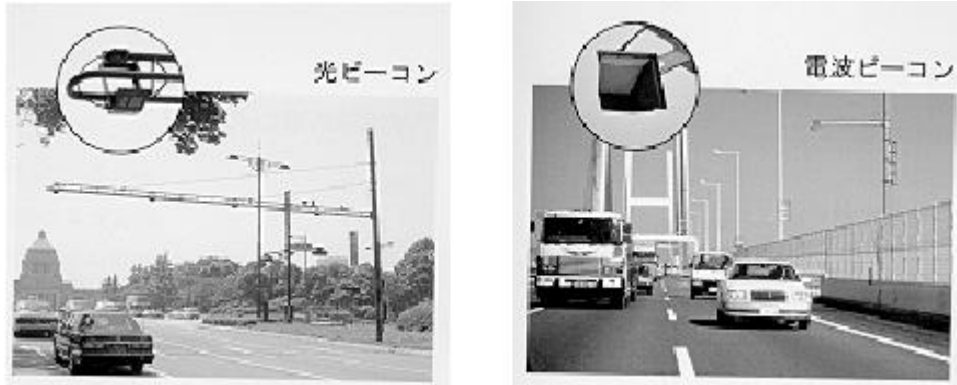
Para facilitar a introdución no mercado dos desenvolvementos destes programas, en 1991 creouse a European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization (ERTICO), que se atopa actualmente vixente, e na que se achán integrados a maioría dos países europeos e un elevado número de institucións.

Xapón foi o primeiro país en introducir sistemas de control do tráfico; isto foi debido ás limitacións de espazo, e ao elevado número de vehículos existentes xa en 1970. En moitas áreas urbanas, as velocidades de circulación eran inferiores a 16 km/h durante moitas das horas do día. Por este motivo, o goberno xaponés instalou dispositivos de control de tráfico en todas as grandes cidades e na maioría das zonas interurbanas. Estes dispositivos están orientados, fundamentalmente, a proporcionar información ao condutor.

Xa en 1970 apareceu o primeiro sistema de navegación, CACS, aínda que con escasa aceptación no mercado. Con todo, desde mediados dos anos 80 iniciáronse varios proxectos ITS: RACS, AMTICS e SSVS, organizados desde instancias gobernamentais diferentes.

O programa RACS propuxo un desenvolvemento nas infraestruturas, mediante a instalación de tres tipos de balizas na estrada para proporcionar información e axuda ao condutor. Un tipo de baliza proporcionaba información da posición do vehículo con respecto a unha orixe, de tal forma que se puidesen corrixir os erros na navegación. As balizas de tipo 2 proporcionaban datos sobre o estado do tráfico, e as de tipo 3 intercambiaban información co vehículo (situación, débedas de peaxes, etc.)

Ao mesmo tempo, e baixo outros patrocinadores, o programa AMTICS empregaba un sistema cun equipamento a bordo do vehículo similar ao proposto por RACS, pero con outro interface de usuario. Neste sistema procúrase ofrecer ao condutor unha ampla variedade de información, a través de terminales fixos en estacións de ferrocarril, hoteis, etc., así como no propio vehículo.



Imaxe 1 Sistemas de balizas por infravermellos e microondas.

No programa VICS, que comezou en 1996, unha unidade central de supervisión recibe información en tempo real sobre o estado de cada unha das estradas e, á súa vez, proporciona información ao condutor a través de balizas e da radio. O sistema de comunicación que empregan as balizas instaladas nas autopistas son as microondas, mentres que as balizas situadas nas rúas realizan as súas emisións por infravermellos.

A partir de 1994, o esforzo en investigación e desenvolvemento foi máis harmonioso entre os distintos organismos, e recolleuse en VERTIS, que é un programa similar ao ERTICO europeo. Deste xeito, a investigación en ITS en Xapón dividiuse nas seguintes nove áreas, que están actualmente en estudo e desenvolvemento:

1. Avances en sistemas de navegación.
2. Sistemas de telepeaxe.
3. Asistencia para a seguridade na la conducción.
4. Optimización da xestión do tráfico.
5. Aumento da eficiencia na la xestión de estradas.
6. Asistencia ao transporte público.
7. Aumento da eficiencia no el traballo de vehículos comercias.
8. Asistencia a peóns.
9. Asistencia a vehículos en situación de urxencia.

Nos Estados Unidos, o programa PATH, fundado polo California Department of Transportation e o Institute of Transportation Studies da Universidade de Berkeley, promoveu os principais proxectos de investigación en vehículos avanzados e sistemas de estrada. Así mesmo, a investigación levada a cabo polo programa PATH estimulou o estudo dos sistemas de transporte ao longo dos Estados Unidos. A idea principal nestas investigacións consistía en substituír un grupo de decisións e accións levadas a cabo polo condutor, por un conxunto de tarefas máis sistematizadas e precisas executadas por un ordenador, coa fin de alcanzar un fluxo de tráfico máis regular e, conseguintemente, obter unhas estradas máis seguras e capaces de albergar unha maior densidade de tráfico; estas operacións poderían ser automatizadas nas estradas do futuro, así como

as relacións entre elas. Así, propóñense diferentes estruturas xerárquicas de control formadas por varios niveis de automatización e faise unha relación detallada das operacións incluídas en cada unha das estruturas. Por exemplo, para unha manobra de cambio de carril, un sistema central de planificación é responsable de desenvolver e coordinar unha manobra segura e que teña en conta o tempo dispoñible, en función dos outros vehículos presentes na vía, e de dar as ordes para executar os movementos apropiados. Posteriormente, outro sistema de regulación a bordo de cada un dos vehículos encárgase de executar as ordes ditadas pola capa anterior. Aínda que unha automatización tan ampla como a descrita nestes artigos resulta un tanto visionaria desde o punto de vista práctico, e requiriría novos elementos nas infraestruturas e nos vehículos, as claras definicións de cada operación e as cuestións relacionadas constituíron unha axuda para o avance do estado da arte na automatización parcial dos vehículos. Este estudo serviu tanto para facilitar o camiño cara á meta final da automatización das autovías, como para aplicacións a curto prazo.

Neste mesmo contexto dos sistemas de AHS, levouse a cabo unha considerable investigación en control e en tecnoloxía de sensores para gobernar un pelotón de vehículos simultaneamente. A idea de fondo consiste en formar unha ringleira de vehículos que se seguen uns a outros a curta distancia, a velocidades propias da circulación en autovía, sen risco de choques ou de interferencia con outros pelotóns de vehículos. Demostrouse que, diminuíndo o espazo entre vehículos, mellórase considerablemente a capacidade das vías. No entanto, un pelotón composto por vehículos equiespaciados só é estable se dispón dalgún tipo de comunicación entre eles. Isto supón que todos os vehículos no pelotón estean equipados con algún dispositivo de radio-comunicación. Realizáronse con éxito probas en estrada con pelotóns de vehículos e actualmente continúa a investigación neste campo, con vistas a mellorar a próxima xeración de estradas.

1.3.3 Vehículos Intelixentes

Como vimos, nos comezos da década dos 90, coa fin de proporcionar ao condutor unha maior información, a investigación en Estados Unidos e Europa estaba máis orientada cara aos AHS, que requiren infraestruturas tanto nos vehículos como nas estradas.

Debido a problemas económicos e a limitacións prácticas, a investigación a curto prazo desprazouse desde os AHS cara aos IVI, e centrouse en sistemas de asistencia ao condutor. Estes sistemas pódense instalar en vehículos reais sen necesidade de realizar custosas modificacións en infraestruturas, e proporcionan ao condutor información, alarma e axuda nalgunhas operacións. Algúns sistemas que podemos empregar nos vehículos de hoxe en día como os ACC, o control “stop and go”, a alarma de colisión, e sistemas para evitar colisións, desenvolvéronse dentro desta liña de investigación. Moitos desenvolvementos realizados no terreo da automatización de estradas tamén son aplicables neste campo, posto que os requerimentos de control e sensorización son similares. Con todo, non convén esquecer que existen numerosas diferenzas na

formulación conceptual, que fan que a incidencia de cada un destes sistemas na seguridade, capacidade das estradas e confort da condución poida ser dispar.

Os vehículos equipados con sistemas de control que realizan algunhas manobras de forma completamente automática, ou con algunha axuda do condutor, son os Autonomous Road Vehicles (ARV), que fan unha revisión das distintas posibilidades de automatización: control lonxitudinal, lateral e vertical. A continuación, séguese esta clasificación para pasar revista aos distintos sistemas que progresivamente se investigaron para a súa instalación no automóbil. No seguinte apartado farase unha revisión máis centrada nos aspectos técnicos do control.

A. Vehículos Totalmente Autónomos.

Os vehículos totalmente autónomos constitúen un apartado singular dentro do estado da arte. A súa aplicación práctica, polo momento, non deixa de ser case inviable (necesítase moita confianza no vehículo e no sistema de control), pero son un banco de ensaios excelente para o desenvolvemento de controis parciais e de aplicacións que posteriormente poidan levarse aos vehículos comerciais.

O primeiro vehículo autónomo foi construído en Xapón en 1977 dentro do proxecto CACS. O vehículo posuía un sistema de control bastante rudimentario que podía manexar o volante do vehículo durante aproximadamente 50 m, empregaba un motor encostado á barra de dirección, e estaba baseado en visión artificial e control proporcional. Este mesmo grupo de investigación continuou a súa procura, e desenvolveu controladores laterais e lonxitudinais, baseados fundamentalmente nun posicionamento do vehículo mediante GPS e comunicación entre os vehículos.

En EEUU, a maioría dos primeiros proxectos significativos neste campo foron financiados polo Ministerio de Defensa. En 1986 comezou o proxecto NavLab da Carnegie Mellon University, no que se desenvolveron varios vehículos prototipos capaces de circular de forma autónoma en autopistas con liñas ben marcadas no asfalto. Entre estes vehículos atópanse tanto turismos como autobuses, e ata vehículos todo terreo para realizar expedicións campo a través con fins militares.

O proxecto centrouse no control automático de vehículos en autopistas (AHS). Para a condución autónoma dun vehículo en estrada, unha parte moi importante é o recoñecemento da contorna. Neste traballo probáronse diversos algoritmos para a detección dos bordos da estrada. Un deles é o denominado ALVINN, que está baseado no adestramento dunha rede neuronal, e que conseguiu conducir o vehículo de proba Navlab 1 durante 21.2 millas con velocidades de ata 55 millas/h nas primeiras etapas do proxecto. Posteriormente, conseguíronse traxectos de miles de quilómetros por autopista a velocidades próximas aos 100 km/h.

Como instrumentación, o sistema funciona cunha simple cámara en cor, de baixo custo,

un radar e un ordenador persoal corrente. O proxecto Navlab demostra a viabilidade de resolución de problemas de navegación autónoma reais, con máquinas baratas e coñecidas, como son os ordenadores persoais. Desenvolvéronse ata once versións de vehículos dentro do proxecto.



Imaxe 2 Vehículos desenvolvidos no proxecto Navlab

En 1997, realizouse unha proba definitiva do sistema en San Diego, patrocinada polo Nacional Automated Highway System Consortium (un grupo de corporacións, universidades e axencias gobernamentais) de Estados Unidos. Levouse a cabo a condución autónoma dun autobús con pasaxeiros durante varios centos de quilómetros. O autobús, ilustrado na Imaxe 2, foi conducido de forma manual ata a autopista, e a partir de aí o condutor conmutou o sistema a funcionamento automático. O condutor só debe volver tomar as rendas da condución cando decida saír da autopista, no punto que corresponda.

O sistema ofrece outras prestacións, igualmente interesantes. Por exemplo, mantense unha distancia de seguridade predeterminada co vehículo precedente, o cal pode salvar vidas e aumentar a eficiencia de condución en atascos. Doutra banda, realízanse manobras de cambio de carril, empregando para iso o sistema baseado nun radar instalado no vehículo.

Leváronse a cabo varios intentos, por parte do goberno norteamericano, de comercializar estes sistemas, especialmente o vehículo automático para autopistas. No entanto, o seu funcionamento en contornas urbanas sería moi difícil, ao depender das liñas pintadas nas rúas. Por este motivo, a investigación de Navlab céntrase agora mesmo na determinación de traxectorias en distintas contornas.

En Europa, Dickmans desenvolveu varios prototipos capaces de guiarse autonomamente, ata lograr guiar o vehículo nas autopistas alemás, con tráfico real e alcanzando velocidades de ata 130 km/h. Este vehículo incluía un sistema composto por 4 cámaras en cor, tres sensores inerciais, un tacómetro, sensores de ángulo e un sofisticado sistema de proceso.

Durante a década dos 90, na Universidade de Parma desenvolveuse o proxecto ARGO, no ámbito do proxecto europeo EUREKA PROMETHEUS. ARGO finalizou en 1994 cunha demostración dos resultados conseguidos en París, pero a investigación continuou na Universidade de Parma, financiada polo Consello de Investigación Nacional Italiano.

Equipouse un vehículo comercial (Lancia Thema 2000), cos dispositivos necesarios para realizar a conducción autónoma en autopistas. O vehículo dispón dun sistema de adquisición trinocular, e emprega como procesador un sinxelo PC-Pentium baixo o sistema operativo Linux, xunto a un procesador hardware desenvolvido especificamente para esta aplicación, denominado PAPRICA.



Imaxe 3 Vehículo autónomo ARGO

Durante a primeira semana de Xuño en 1998, o vehículo realizou unha viaxe de demostración ao redor de Italia, o MilleMiglia in Automático, durante o cal o vehículo conduciu máis de 2000 km de forma autónoma. O sistema ten tres posibilidades de conducción:

- Manual: o sistema monitoriza a actividade do condutor e emite sinais acústicos e ópticos de aviso, en caso de situacións potenciais de perigo.
- Supervisada: o sistema advirte ao condutor con sinais ópticos e acústicos e, en caso de perigo, toma o control do vehículo.
- Automática: o sistema conduce automaticamente, seguindo as liñas do carril, e localizando obstáculos en condicións de tráfico real. É incluso capaz de realizar cambios de carril.

Debido ás características do sistema de visión artificial utilizado, o vehículo pode conducir de forma autónoma tanto en autopistas como nalgunhas estradas locais, sempre que presenten liñas pintadas sobre o asfalto.

Recentemente, en España levouse a cabo o proxecto AUTOPÍA, no que se desenvolveron varios vehículos autónomos. Inicialmente, desenvolveuse un sistema de visión, integrado con GPS para determinar o posicionamento do vehículo en estrada, que incorporaba a capacidade de recoñecemento de interseccións e de estradas carentes de liñas. A conducción destes vehículos realízase mediante controladores borrosos, e un controlador PID para a regulación do motor asociado á barra do volante.

En 2013, a compañía norteamericana Oshkosh desenvolveu un novo sistema para operar con vehículos terrestres sen necesidade de tripulantes; trátase de vehículos militares, que aporta o sistema de visión, porque ten un maior coñecemento da súa contorna, e ademais pódese prescindir de manexalo en situ.

En 2014 o ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council) recoñeceu o seu importante papel para garantir un enfoque dos niveis máis altos para a aplicación da conducción autónoma. Así, o ERTRAC estableceu un grupo de traballo coas partes interesadas e expertos para definir unha folla de ruta conxunta para a automatización da conducción.

ERTRAC recoñece as definicións da norma SAE J3016¹ para a conducción automatizada. Esta sección contén as definicións comúns das diferentes funcións da automatización. Na norma expóñense 6 niveis de conducción autónoma para os vehículos de rúa:

- Nivel 0: Sen automatización. O condutor humano encárgase totalmente da conducción dinámica do vehículo, incluso cando se ve reforzada por sistemas de advertencia.
- Nivel 1: Asistencia alo condutor. O condutor ten unha asistencia na conducción da dirección ou aceleración/deceleración utilizando información do entorno da conducción e coa expectativa de que o condutor humano realice todos os aspectos restantes da tarefa de conducción dinámica.
- Nivel 2: Automatización parcial. O condutor ten unha ou varias asistencias na conducción da dirección e aceleración/deceleración utilizando información do entorno da conducción e coa expectativa de que o condutor humano realice todos os aspectos restantes da tarefa de conducción dinámica.
- Nivel 3: Automatización condicionada. Realízase a conducción automática en todos os aspectos da conducción dinámica coa expectativa de que o condutor humano teña que actuar adecuadamente ante unha solicitude de intervención.
- Nivel 4: Automatización alta. Realízase a conducción automática en todos os aspectos da conducción dinámica incluso se o condutor humano non responde adecuadamente a unha solicitude de intervención.
- Nivel 5: Automatización completa. Rendemento a tempo completo por un sistema de conducción automática en todos os aspectos da conducción dinámica en todas as estradas e baixo as condicións ambientais que un condutor humano pode xestionar.

Na actualidade estase traballando para implementar e levar a rúa vehículos que sexan totalmente autónomos, entre os anos 2020 e 2030. Empresas automobilísticas como Volvo, Tesla, Peugeot-Citroën son algunhas das marcas que máis avanzan neste campo; un reto ao que tamén se uniron xigantes tecnolóxicos como Apple, co programa Titán, e Google, que xa está realizando probas reais nos arredores da súa sé en California.

Ademais destes vehículos, totalmente autónomos, froito da investigación logrónse sistemas de diverso grao de automatización que se describen a continuación. Moitos

¹ http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id38/ERTRAC_Automated-Driving-2015.pdf

deles resúltannos xa familiares, mentres que outros están dando os primeiros pasos de cara á súa integración en vehículos comerciais. En moitos casos, respectáronse os nomes en inglés, por atoparse moito máis asentados que a tradución.

B. Control Lonxitudinal.

- Cruise Control (CC).

Este sistema o control atópase xa moi estendido. Nel, o sistema de control do vehículo límtase a regular a velocidade. O condutor debe vixiar a distancia aos vehículos precedentes e, se é necesario, reducir a velocidade ou asumir o control manual da mesma.

O sistema non require engadir sensores adicionais aos que xa posúe o vehículo, como o sensor de velocidade do motor, sensores de velocidade das rodas, etc.

- Adaptive Cruise Control (ACC).

Os sistemas ACC, que poden detectar a distancia ao vehículo precedente e manter un especialmente constante entre ambos, constitúen unha aplicación do control de cruceiro aos vehículos actuais. O obxectivo é descargar ao condutor da tarefa pesada que supón manter a distancia co vehículo precedente a velocidades propias de desprazamentos en autopista.

O sistema ACC pode funcionar de dous xeitos: sen vehículo precedente (modo autónomo), e en seguimento dun vehículo precedente (modo de seguimento adaptativo).

- Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC).

Se se incorpora un sistema de comunicación no sistema de control que determina a manobra que debe desempeñar o ACC, de tal xeito que se poida establecer comunicación sobre a marcha, é posible intercambiar información cos vehículos adxacentes, e incorporala ao sistema de control. Deste xeito, pódense superar os problemas debidos ao mostraxe e filtrado do sinal do radar. A información máis importante que se intercambia entre os vehículos é a velocidade, a aceleración, o ángulo de desprazamento do pedal do acelerador, a presión do freo, o xiro do volante, unha variable para o caso de que se produza fallo, e unha variable de identificación da manobra.

- Sistemas "Stop & Go".

Os sistemas de control stop and go constitúen unha extensión dos sistemas ACC, que fan que o vehículo sexa capaz de acelerar e frear automaticamente durante o tránsito

en cidade. Mediante este sistema preténdese reducir a carga de traballo en áreas suburbanas, onde os sistemas ACC practicamente non teñen aplicación. Ao mesmo tempo, os retos que suscitan os sistemas de control stop and go son tamén maiores que os ACC, debido á contorna de condución, que é máis complicado, e aos requisitos para os sensores, que son máis esixentes.

- Automated Vehicle Following.

Unha forma de diminuír o tráfico ao longo das estradas é formar grupos ou pelotóns de vehículos totalmente automatizados, de forma que a distancia entre eles poida reducirse o máis posible. Para iso, os carriles previstos para a circulación destes pelotóns instrumentaríanse con imáns no centro do carril. Á súa vez, os vehículos envoltos na manobra deben estar instrumentados con radar, magnetómetros e GPS, de tal xeito que sexa posible determinar a distancia entre os vehículos con fiabilidade. Xunto a isto, a comunicación entre vehículos é indispensable.

- Sistemas de Alarma e Asistencia ao Conductor.

Nos últimos anos, realizáronse deseños de vehículos moito máis seguros grazas a unha maior preocupación pola seguridade fronte ás colisións. Debido a este esforzo, aínda que o número de accidentes aumentou, logrouse que o número de falecementos en accidente de estrada diminúa. Con todo, é necesario continuar o esforzo por reducir o número de accidentes que, ademais de danos persoais, producen un elevado número de perdas económicas. Por exemplo, as colisións traseiras ascenden anualmente a 1,8 millóns e constitúen o 28 por cento de todos os accidentes.

Esta iniciativa fomentou unha ampla investigación en sistemas de alarma e prevención de colisións, que poidan aumentar a seguridade do pasaxeiro e reducir perdas, ao evitar accidentes que ocorrerían no caso de que o control fose unicamente do conductor.

B. Control Lateral.

Como se viu ao falar da formación de pelotóns de vehículos, parte do control lateral está orientado a manobras automáticas de cambio de carril e de axuda para manter ao vehículo no propio carril. Nestas manobras débense considerar dous erros:

- O erro en distancia entre o centro do parachoques dianteiro e o centro do carril.
- O erro angular con respecto á tanxente da estrada.

Como instrumentación, estes sistemas necesitan un magnetómetro colocado baixo o parachoques frontal e traseiro (ou un GPS), que se empregan para avaliar o ángulo de guiñada do vehículo e a velocidade de cambio deste mesmo ángulo, con respecto a unha liña que describa a estrada.

Doutra banda, no referente ao control lateral do vehículo, realizouse un gran desenvolvemento nos sistemas de control de freada e de estabilidade do vehículo ao describir unha traxectoria.

C. Control vertical.

Os desenvolvementos nesta área teñen fundamentalmente dúas direccións:

1. Mellorar a calidade do guiado do vehículo.
2. Mellorar a estabilidade do vehículo en estradas en malas condicións e/ou en situacións de urxencia como son os sistemas de Frontal Collision Warning and Avoidance.

Estas dúas direccións de investigación son diverxentes desde o punto de vista do deseño do control da suspensión. Neste sentido, para mellorar o guiado do vehículo en situacións normais nas que as forzas proporcionadas polos pneumáticos non alcanzaron a saturación, débese manipular a suspensión, de tal modo que o vehículo manteña:

- a estabilidade
- uns valores adecuados de rixidez do resorte e da amortiguación.
- valores mínimos da aceleración e a súa derivada (sobreaceleración) nas tres direccións e os tres ángulos.

Por outra banda, en situacións de urxencia, débese procurar que cada roda proporcione a adherencia necesaria, tanto lonxitudinal como transversal. A adherencia de cada roda depende da forza normal sobre ela, da rixidez do pneumático e do seu deslizamento.

1.3.4 Esquemas de Control para a Automatización.

Unha das áreas máis estudadas na automatización da conducción é a metodoloxía de control. Unha vez que se dispón de información suficiente para determinar a situación do vehículo na estrada e con respecto a outros vehículos, necesítase un esquema de control, tanto para axudar ao condutor como para controlar autonomamente o vehículo na súa totalidade. Normalmente, un controlador de máis alto nivel, dotado dun modelo do vehículo, determina os valores de velocidade e aceleración baixo os que o vehículo se mantén controlado durante o transcurso do movemento. Nos sistemas de asistencia ao condutor, as indicacións de actuación proporcionadas polo controlador compáranse coa acción do condutor e, se é necesario, emítase un sinal de alarma. En sistemas aínda máis avanzados, o controlador determina tamén o movemento desexado, para que sexa

executado por outros controladores de menor nivel que controlan o acelerador, os freos, a dirección, etc. O deseño dos controladores de alto nivel require un bo coñecemento da contorna do vehículo. Para deseñar os controladores de baixo nivel necesítase un bo modelo do vehículo. Realizouse un esforzo teórico e práctico considerable para desenvolver controladores e modelos de vehículos de diferentes niveis de complexidade.

- Controladores a nivel de vehículo.

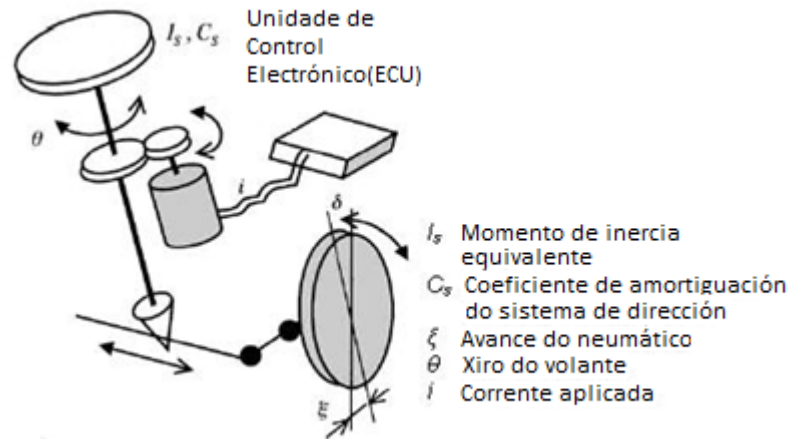
Para deseñar controladores de alto nivel só é relevante a cinemática global do vehículo, pero para o deseño de controladores a nivel do vehículo necesítase un bo modelo da dinámica vehicular.

As aplicacións de control lonxitudinal requiren un modelo do motor, a transmisión, os pneumáticos e o sistema de freos. O control lateral tamén precisa un modelo de dirección. Os modelos realistas destes sistemas son altamente non lineais e difíciles de resolver, especialmente en tempo real. Por este motivo, propuxéronse poucos modelos diferentes para o deseño de controladores.

Outro reto en control lonxitudinal represéntano a correcta modelización e o control dos freos. O comportamento dos freos depende de varios parámetros, como a temperatura e o coeficiente de fricción entre o pneumático e o chan, que non son constantes e son difíciles de modelizar.

A maioría dos controladores arriba mencionados son controladores de ganancia fixa, é dicir, non varían en función de cambios que se poidan producir no vehículo. No entanto, os parámetros característicos de calquera vehículo varían ao longo da súa vida útil. Algún dos parámetros do vehículo ou da estrada, como é a resistencia á rodadura, poden ata variar durante un único desprazamento, dependendo do tipo de superficie. A sensibilidade á variación dalgúns parámetros é especialmente importante para os vehículos pesados. A masa dun destes vehículos pode variar ata nun 400 % dun traxecto a outro. Por estes motivos, resulta conveniente un enfoque adaptativo, no que os parámetros do modelo do vehículo varíen, cun estimador implícito ou explícito para obter un control máis satisfactorio.

Para o control lonxitudinal de HDV, propúxose un controlador adaptativo con adaptación directa de ganancias dun controlador PIQ (Proporcional-integral-cuadrático). Deseñouse un control adaptativo empregando unha función de time-delay control para o control lonxitudinal; este controlador observa a resposta do sistema e da variable de control no pasado, para modificar directamente a acción de control, en lugar de axustar a ganancia do controlador ou identificar os parámetros do sistema.



Imaxe 4 Esquema de actuación para o control da dirección proposto por Shimakage

Para o control en manobras de urxencia lateral ou de mantemento de carril é necesario controlar a dirección; a modelización da dirección depende da interacción entre o pneumático e o chan. Esta depende á súa vez de moitos parámetros (carga sobre a roda, presión do pneumático, estado da superficie da calzada e do pneumático, etc.) e é difícil de modelizar. Por este motivo, a maioría dos autores empregan un modelo simplificado para o control da dirección. Desenvolveuse un sistema de control do par sobre a dirección para axuda ao condutor no mantemento do carril. O esquema de actuación é o indicado na Imaxe 4. Propoñen un control LQ cun modelo de bicicleta do automóbil, e que se probou con éxito en vehículos reais.

Posteriormente desenvolveuse un modelo máis detallado da dirección para un vehículo 4x4, e deseñaron un controlador con anticipación (preview) para seguimento de traxectoria. mostraron mellores resultados no seguimento da traxectoria cando se dispón de información sobre o tramo próximo da estrada que se quere percorrer.

O maior esforzo nos deseños anteriormente mencionados céntrase en desenvolver bos modelos do motor, a transmisión, os freos e a dirección. Moita da información relativa a estes sistemas é propiedade dos fabricantes e, por este motivo, a información para investigadores do mundo académico atópase limitada. Con todo, nos vehículos actuais, unha gran parte desta información está dispoñible a través dun interface de usuario da unidade de control. A conexión CANBUS do vehículo proporciona información sobre o par estático do motor, o estado da transmisión, a velocidade de xiro do motor e a velocidade do vehículo. Estes sinais transmítense baixo un estándar que está a disposición do público.

Ao desenvolver modelos para o control lonxitudinal acéptase xeralmente que os pneumáticos non deslizan. Esta hipótese reduce a complexidade dos modelos e os controladores, e é aceptable para aplicacións como o ACC, nas que se evitan elevados niveis de aceleración ou freado. Con todo, en manobras de urxencia as rodas seguramente deslizarán. Neste contexto, necesítase modelizar correctamente o deslizamento do pneumático para asegurar un comportamento adecuado do controlador. Este aspecto hase ter en conta nalgúns artigos de investigación pero, de

cara ao futuro, necesítase unha maior investigación nesta dirección. A interacción pneumático-chan en diferentes contornas tamén é importante para o deseño de controladores laterais. Esta información, por exemplo, sería crucial para un sistema de prevención de colisións que conduza o vehículo con seguridade fóra da zona de perigo.

1.4 Obxectivos

O obxectivo deste traballo é a aplicación dun simulador multicorpo para o deseño, axuste e avaliación de controladores de vehículos autónomos. Búscase o desenvolvemento de controladores que permitan ao vehículo realizar manobras para a conducción automática do automóbil, avanzando na investigación para a mellora constante dos sistemas.

Dentro deste obxectivo xeral distínguense tres propósitos principais:

- Modelizar un circuíto con rectas e curvas, de maneira que permita establecer variables de control do vehículo para o deseño de controladores. Así, en función da contorna pódese saber en cada instante que facer para seguir o traxecto de xeito confortable e sen sobresaltos.
- Definir e avaliar distintas estratexias de control, tanto nas variables de control como nas técnicas de control que se van empregar. O erro en posición do vehículo con respecto ao centro do carril, o erro angular con respecto á dirección do trazado ou a velocidade nese instante poden ser diferentes variables de control; de entre as técnicas de control posibles seleccionáronse o control PID e a lóxica borrosa.
- Definir criterios de comparación para a avaliación dos controladores. Unha vez elaborados os controladores, avaliáremoslos tendo en conta distintos criterios, como a magnitude dos erros acumulados, a rapidez do controlador para completar unha volta, ou o comportamento ante un cambio nas condicións de funcionamento do sistema.

2. Sistemas de control empregados

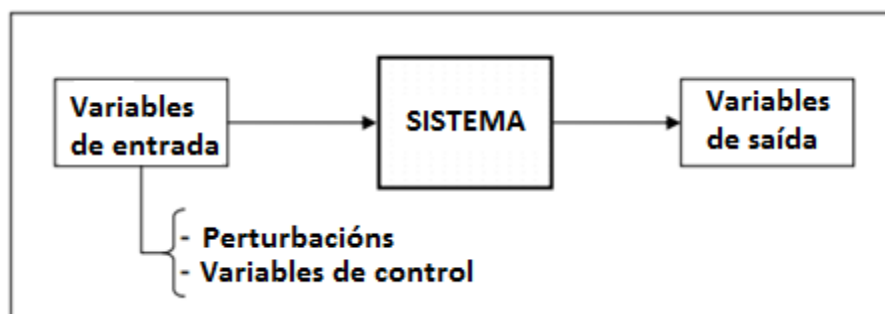
2.1 Definición

Un sistema de control é un conxunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirixir ou regular o comportamento doutro sistema, coa fin de reducir as probabilidades de erro e obter os resultados desexados. É un sistema que se caracteriza pola presenza dunha serie de elementos que permiten influír no funcionamento do sistema. A finalidade dun sistema de control é conseguir, mediante a manipulación das variables de control, un dominio sobre as variables de saída, de modo que estas acaden uns valores prefixados (consigna ou punto de referencia).

O control é un concepto moi común e amplamente usado por moitas persoas no día a día. Pode haber control manual e control automático. Un sistema de control manual é, por exemplo, o de conducir un automóbil, onde se necesita controlar o vehículo coas súas diferentes palancas para lograr chegar ao lugar desexado. O control automático involucra soamente a máquinas, un exemplo común é o control do nivel de auga dun tanque, onde dependendo do nivel do líquido abrírase ou pecharase a válvula correspondente ao seu enchido.

O control aplícase en todas as ramas da enxeñería. Algunhas aplicacións son: a robótica, onde se controla a velocidade, posición e forza coa que os manipuladores interactúan co medio; a industria química, onde o control é aplicado ao fluxo de líquidos, presión de gas, nivel de líquidos en depósitos, etc.; incluso o corpo humano conta con mecanismos que traballan como control automático, por exemplo o diámetro da pupila do ollo, a presión sanguínea, o ritmo respiratorio, etc., son procesos biolóxicos que se poden ver como equivalentes ao control automático realimentado. Os sistemas que hai que controlar poden ser da máis variada natureza.

Un sistema de control recibe unhas accións externas ou variables de entrada, e as respostas a estas accións externas son as denominadas variables de saída. As accións externas ao sistema divídense en dous grupos: variables de control -que se poden manipular- e perturbacións sobre as que non é posible ningún tipo de control. A Imaxe 5 ilustra conceptualmente o funcionamento dun sistema.



Imaxe 5 Esquema xeral dun sistema de control

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir o seu obxectivo cumprindo os seguintes requisitos:

1. Garantir a estabilidade e, particularmente, ser robusto fronte a perturbacións e erros nos modelos.
2. Ser tan eficiente como sexa posible, segundo un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que a acción de control sobre as variables de entrada sexa realizable, evitando comportamentos bruscos e irreais.
3. Ser fácil de implementar e cómodo de operar en tempo real con axuda dun ordenador.

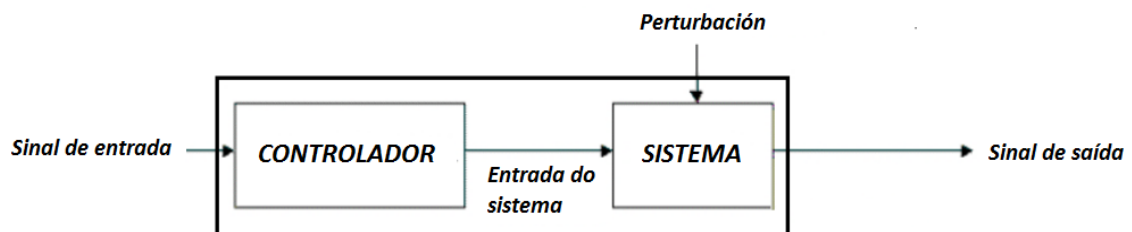
2.2 Sistema de control de lazo aberto y lazo pechado

2.2.1 Introducción

Existen dúas clasificacións principais de control: os sistemas de control de lazo aberto e os de lazo pechado. Aqueles nos que a variable de saída (variable controlada) non ten efecto sobre a acción de control (variable de control) son de lazo aberto; mentres que nos sistemas de lazo pechado o sinal de saída (variable controlada) do sistema ten efecto directo sobre a acción de control (variable de control).

2.2.2 Lazo aberto

É aquel sistema en que só actúa o proceso sobre o sinal de entrada, e dá como resultado un sinal de saída independente ao sinal de entrada, pero baseada na primeira. Isto significa que non hai retroalimentación cara ao controlador para que este poida axustar a acción de control. É dicir, o sinal de saída non se converte en sinal de entrada para o controlador. Na Imaxe 6 móstrase un esquema de un control de lazo aberto.



Imaxe 6 Esquema dun sistema de control de lazo aberto

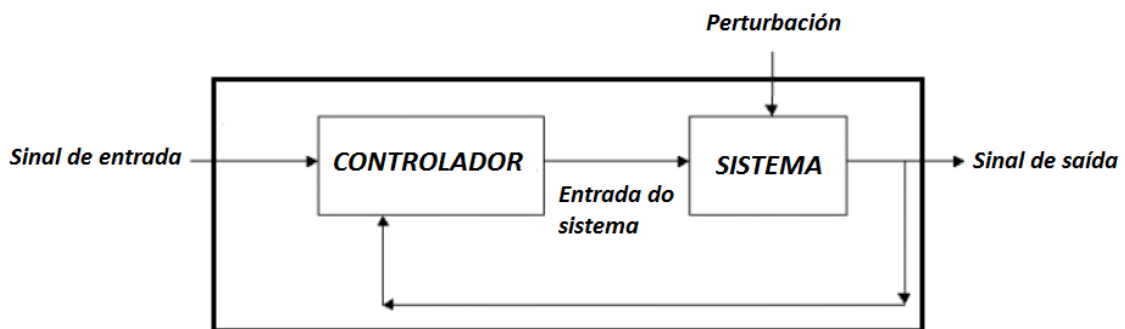
Un exemplo pode ser o enchido dun tanque usando unha manguera de xardín. Mentres que a chave siga aberta, a auga fluirá, sen embargo, a altura da auga no tanque non pode facer que a chave se peche.

Estes sistemas reúnen as seguintes características:

- Son sinxelos e de fácil concepto.
- A súa estabilidade non está asegurada ante unha perturbación.
- A precisión depende da previa calibración do sistema.

2.2.3 Lazo pechado

Son os sistemas nos que a acción do control está en función do sinal de saída. Os sistemas do circuíto pechado usan a retroalimentación dende un resultado final para axustar a acción de control en consecuencia. Na Imaxe 7 móstrase un esquema de un control de lazo pechado.



Imaxe 7 Esquema dun sistema de control de lazo aberto

O control en lazo pechado emprégase cando:

- Un proceso non se pode regular manualmente.
- Existe unha produción a gran escala que esixe grandes instalacións e o home non é capaz de manexar por si só.
- É necesario controlar un proceso que é especialmente difícil nalgúns casos e que require unha atención que o home pode perder facilmente por cansazo ou despiste, cos conseguíntes riscos que iso poida ocasionar para o traballador e para o proceso.

As súas características son:

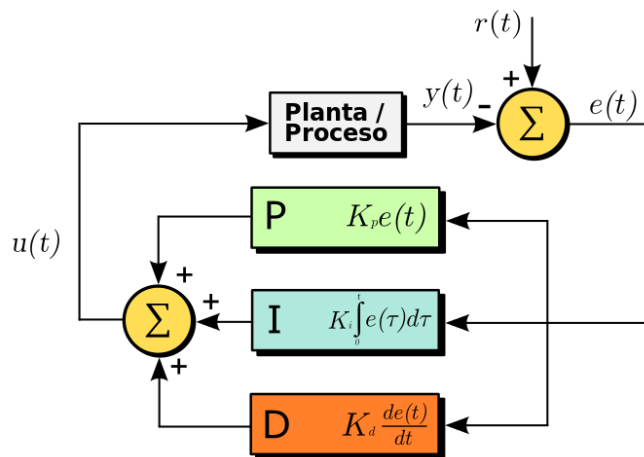
- Complexos, pero amplos en cantidade de parámetros.
- A súa propiedade de retroalimentación.
- É máis estable fronte a perturbacións e variacións internas que o de lazo aberto.

Un exemplo de lazo pechado pode ser un equipo de aire acondicionado, xa que conta cun sensor que permanentemente rexistra a temperatura ambiente, e cun comparador, que determina se a temperatura é a desexada. Se é necesario corríxila, o comparador dá o sinal para que isto ocorra.

2.3 Controlador PID

2.3.1 Introducción

Un controlador PID é un mecanismo de control de lazo pechado que calcula a desviación ou erro entre un valor medido e un valor desexado. O algoritmo do control PID ten en conta tres parámetros distintos: o proporcional, o integral e o derivativo. Podemos ver un esquema ilustrativo na Imaxe 8. O valor proporcional depende do erro actual. O integral depende dos erros pasados e o derivativo é unha predición de erros futuros.



Imaxe 8 Lazo de control de un PID

Onde:

- $u(t)$ é a sinal de entrada
- $y(t)$ é a sinal de saída
- $r(t)$ son as perturbacións que afectan ao sistema
- $e(t)$ é o erro entre o valor buscado e o valor que ten o sistema
- P é a actuación proporcional e seu valor é $K_p e(t)$
- I é a actuación integral e seu valor é $K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$
- D é a actuación derivativa e seu valor é $K_d \frac{de(t)}{dt}$

Cando non se ten coñecemento do proceso, historicamente vense considerando que o controlador PID é o controlador máis axeitado. Ao axustar a ganancia dos termos proporcional, derivativo e integral no algoritmo de control do PID, o controlador pode prover unha acción de control deseñada para os requirimentos do proceso. A resposta do controlador pode describirse de diferentes maneiras: en termos da resposta do control ante un erro, o grado ao cal o controlador excede o punto de axuste, ou o grado de oscilación do sistema. O uso do PID para control non garante control óptimo do sistema ou a súa estabilidade.

Algunhas aplicacións poden só requirir dun ou dous modos dos que prové este sistema de control. Un controlador PID pode ser chamado tamén PI, PD, P ou I en ausencia das accións de control respectivas. Os controladores PI son particularmente comúns, xa que a acción derivativa é moi sensible ao ruído, e a ausencia do proceso integral pode evitar que se alcance ao valor desexado debido á acción de control.

2.3.2 Funcionamento

Para o correcto funcionamento dun controlador PID que regule un proceso ou sistema, necesítase, polo menos:

- Un sensor, que determine o estado do sistema.
- Un controlador, que xere o sinal que goberna ao actuador.
- Un actuado que modifique o sistema de xeito controlado.

Actuación proporcional

A parte proporcional consiste no produto entre o sinal de erro e a constante proporcional, para lograr que o erro en estado estacionario se aproxime a cero. Sen embargo, na maioría dos casos estes valores só serán óptimos nunha determinada porción do rango total do control, de maneira que serán distintos os valores óptimos para cada porción do rango. Por outra banda, existe tamén un valor límite na constante proporcional a partir do cal, nalgúns casos, o sistema alcanza valores superiores aos desexados. Este fenómeno chámase sobre oscilación. É conveniente que a parte proporcional non produza sobre oscilación.

A fórmula do proporcional está dada por:

$$P = K_p e(t) \quad (1)$$

Un símil mecánico desta actuación é a que faría un resorte de rixidez $K = K_p$ que unira a referencia cunha masa que se desexase mover ata devandita referencia. Pódese facer máis rápido aumentando a rixidez do resorte, é dicir, aumentando a ganancia

proporcional do controlador. En contrapartida, tamén é previsible que o sistema oscile máis en torno á referencia.

Actuación integral

O modo de control integral ten como propósito diminuír e eliminar o erro en estado estacionario, provocado polo modo proporcional. O control integral actúa cando hai unha desviación entre a variable e o punto de consigna, integrando esta desviación no tempo e sumándoa á acción proporcional.

O erro é integrado, o cal ten a función de promedialo ou sumalo por un período determinado; logo é multiplicado por unha constante K_i . Posteriormente, a resposta integral súmase ao modo proporcional para formar o control P I, co propósito de obter unha resposta estable do sistema sen erro estacionario.

A fórmula do término integral está dada por:

$$I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

Un exemplo pode ser o mesmo do apartado anterior pero coa masa movéndose verticalmente; se a actuación é puramente proporcional, a masa en réxime permanente non alcanzará a referencia, senón que se colocará no lugar onde a acción do resorte contrarreste a forza do peso. Se se desexa que non exista erro en réxime permanente á acción proporcional, hai que engadir unha actuación extra.

A función integral do erro aumenta paulatinamente mentres exista erro non nulo ata alcanzar, con erro nulo, un valor finito.

Actuación derivativa

Unha forma de evitar as fortes oscilacións que se poidan producir en torno á referencia é engadir á actuación proporcional outra actuación proporcional á derivada do erro. Isto é o mesmo que dotar ao sistema una certa capacidade de anticipación porque a inclusión do termo derivativo é equivalente a actuar proporcionalmente ao erro que existirá no futuro.

Esta “antelación” é beneficiosa porque o sistema é capaz de “frear” antes de chegar á referencia.

A fórmula do derivativo está dada por:

$$D = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Un símil mecánico para a actuación proporcional-derivativa é a de imaxinar que a posición da masa e a referencia se atopan unidas por un resorte e un amortiguador en paralelo. A rixidez do resorte segue sendo igual á ganancia proporcional, mentres que o coeficiente de amortiguamiento é o produto da ganancia pola constante de tempo de derivación.

A saída destes tres termos: o proporcional, o integral, e o derivativo, súmase para calcular a saída do controlador PID. A forma final do algoritmo do PID é:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

2.3.3 Axuste do PID

O obxectivo dos axustes dos parámetros PID é lograr que o bucle de control corrixa eficazmente e no mínimo tempo posible os efectos das perturbacións; tense que lograr a mínima integral de erro. Se os parámetros do controlador PID (a ganancia do proporcional, integral e derivativo) se elixen incorrectamente, o proceso que se quere controlar pode ser inestable -por exemplo, que a saída de leste varíe, con ou sen oscilación- e está limitada só por saturación ou rotura mecánica.

Axustar un lazo de control significa axustar os parámetros do sistema de control aos valores óptimos para a resposta do sistema de control desexada. O comportamento óptimo ante un cambio do proceso ou cambio do valor desexado varía dependendo da aplicación. Xeralmente, requírese estabilidade ante a resposta dada polo controlador, e este non debe oscilar ante ningunha combinación das condicións do proceso nin cambio do valor desexado.

Algúns procesos teñen un grado de non linealidade e algúns parámetros que funcionan ben en condicións de carga máxima non funcionan cando o proceso está en estado de "sen carga".

Hai varios métodos para axustar un lazo de PID. O método máis efectivo xeralmente require do desenvolvemento dalgunha forma do modelo do proceso, por iso se debe elixir P, I e D baseándose nos parámetros do modelo dinámico. Os métodos de axuste manual poden ser moi ineficientes. A elección dun método dependerá de se o lazo se pode desconectar para axustalo, e do tempo de resposta do sistema. Deste xeito, se o sistema pode desconectarse, o mellor método de axuste a miúdo é o de axustar a entrada, medindo a saída en función do tempo, e usando esta resposta para determinar os parámetros de control.

Axuste manual

Este método de axuste consiste en establecer primeiro os valores de ganancia dos termos integral e derivativo (I e D) a cero. A continuación, increméntase a ganancia do término proporcional P ata que a saída do lazo oscile. Logo, establécese a ganancia P ata aproximadamente a metade do valor configurado previamente. Despois increméntase a ganancia de I ata que o proceso se axuste no tempo requirido (aínda que subir moito a ganancia deste termo pode causar inestabilidade). Finalmente, auméntase a ganancia derivativa (D), se se necesita, ata que o lazo sexa o suficientemente rápido para alcanzar a súa referencia tras unha variación brusca da carga.

Un lazo de PID moi rápido alcanza o seu valor desexado de xeito veloz. Algúns sistemas non son capaces de aceptar este disparo brusco; nestes casos requírese doutro lazo cunha ganancia proporcional (P) menor á metade do sistema de control anterior.

Axuste Ziegler-Nichols

Este axuste é o máis utilizado e propón uns parámetros para o PID de forma que o sistema controlado posúa un bo rexeitamento ás perturbacións que se poidan introducir no sistema. Isto quere dicir que o seguimento que fai o sistema á referencia pode ser pouco amortiguado, con demasiado sobre impulso. Pero isto considérase intrascendente comparado coa especificación mencionada.

En moitos procesos industriais un bo rexeitamento ás perturbacións é moito máis interesante que un bo seguimento da referencia. Por exemplo, nunha planta de elaboración de obxectos plásticos, é moi importante que a temperatura do fluído permaneza constante na referencia malia as perturbacións que supoñen a entrada e a saída de material. O proceso inicial de quentamento, ou réxime transitorio, non é moi importante de cara á produción. Poida que sexa máis ou menos longo, con maior ou menor sobre impulso, pero o importante é que unha vez que se chega á temperatura de réxime permanente, as perturbacións non fagan variar a temperatura dentro dun rango permisible.

Axuste dun controlador, método de Ziegler-Nichols			
Tipo de control	K_p	K_i	K_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.45 K_u$	$1.2 \frac{K_p}{T_u}$	-
PID	$0.6 K_u$	$2 \frac{K_p}{T_u}$	$\frac{K_p T_u}{8}$

Táboa 1 Axuste dun controlador mediante o método Ziegler-Nichols

O método de axuste móstrase na Táboa 1.

Os parámetros de ganancia crítica K_u e período de oscilación crítico T_u do sistema pódense obter experimentalmente de varias formas. Unha posibilidade é introducir no sistema que queremos controlar un control proporcional e aumentar a ganancia ata que a saída do sistema sexa oscilatoria ante una entrada chanzo, é dicir, no límite de estabilidade. A ganancia que deixa o sistema no límite de estabilidade é a ganancia crítica K_u , mentras que o período de oscilación que se observe na saída do sistema é o crítico T_u .

2.4 Lóxica difusa (Fuzzy Logic)

2.4.1 Introducción

Foi formulada en 1965 polo enxeñeiro e matemático Lotfi A. Zadeh. A lóxica difusa, tamén denominada lóxica borrosa (Fuzzy Logic, en inglés), baséase no relativo do observado como posición diferencial. Este tipo de lóxica toma dous valores aleatorios, pero contextualizados e referidos entre si. Así, por exemplo, unha persoa que mida dous metros é claramente unha persoa alta, se previamente se tomou o valor de persoa baixa establecéndoo nun metro. Ambos valores están referidos a persoas e tomados nunha medida métrica lineal.

Os controladores borrosos son as aplicacións máis importantes da teoría borrosa. Traballan dunha forma bastante diferente aos controladores convencionais, xa que o coñecemento experto úsase no canto de ecuacións diferenciais para describir un sistema. Este coñecemento pode expresarse dun xeito moi natural, empregando as variables lingüísticas que son descritas mediante conxuntos borrosos.

2.4.2 Funcionamento

A diferenza esencial entre un controlador tradicional e un controlador difuso reside na forma de avaliar a acción de control $u(t)$ en función das entradas da planta $y(t)$.

A lóxica borrosa adáptase mellor ao mundo real no que vivimos, e ata pode comprender e funcionar coas nosas expresións, do tipo “vai moita calor”, “non é moi alto”, “o ritmo do corazón está un pouco acelerado”, etc.

A clave desta adaptación á linguaxe baséase en comprender os cuantificadores de calidade para as nosas inferencias (nos exemplos de arriba, “moito”, “moi” e “un pouco”).

Nos conxuntos difusos defínense tamén as operacións de unión, intersección, diferenza, negación ou complemento, e outras operacións sobre conxuntos, nos que se basea esta

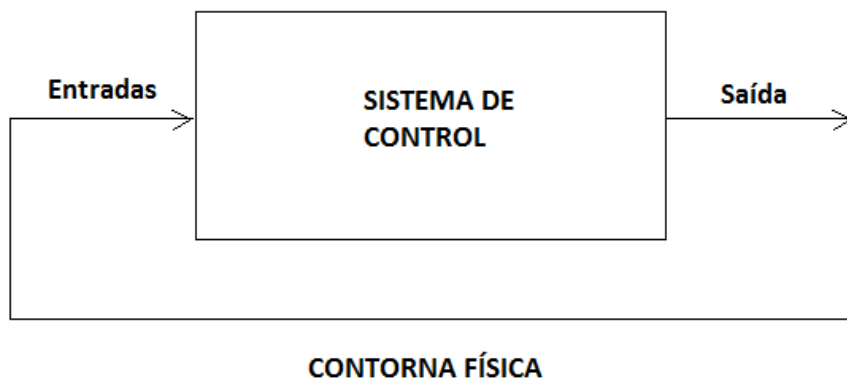
lógica, o que chamaremos regras. As regras das que dispón un sistema difuso poden ser formuladas por expertos ou ben aprendidas polo propio sistema, facendo uso neste caso de redes neuronais para fortalecer as futuras tomas de decisións. Os métodos de inferencia para esta base de regras deben ser sinxelos, versátiles e eficientes.

En función a estas regras determínase as funcións de pertenza para os seus elementos, que indica en que medida o elemento forma parte dese conxunto difuso. As formas das funcións de pertenza máis típicas son trapezoidal, lineal e curva. Baséase en regras heurísticas coa forma SE (antecedente) e ENTÓN (consecuente), onde o antecedente e o consecuente son tamén conxuntos difusos, xa sexan puros ou resultados de operar con eles. Palabras como “moitísimo”, “drasticamente”, “un pouco” e “levemente” son claros exemplos das regras heurísticas para a lógica difusa:

- SE vai moitísimo frío. ENTÓN aumento drasticamente a temperatura.
- SE vou chegar un pouco tarde. ENTÓN aumento levemente a velocidade.

Os resultados de devanditos métodos son unha área final, froito dun conxunto de áreas solapadas entre si (cada área é resultado dunha regra). Para escoller unha saída concreta a partir de tantas premisas difusas, o método máis usado é o do centro de gravidade, no que a saída final será o centro de gravidade da área total resultante.

Un esquema de funcionamento típico para un sistema difuso podería ser o da Imaxe 9.



Imaxe 9 Esquema de funcionamento dun controlador borroso

O éxito dun controlador borroso radica na simplicidade, tanto conceptual como de desenvolvemento. Os dous paradigmas clásicos de control borroso son o enfoque de Mamdani e o de Takagi-Sugeno.

Neste traballo empregouse o método Mamdani. Neste proceso interveñen tres partes principais: as **funcións membro**, os **operadores lóxicos**, e as **regras** de actuación.

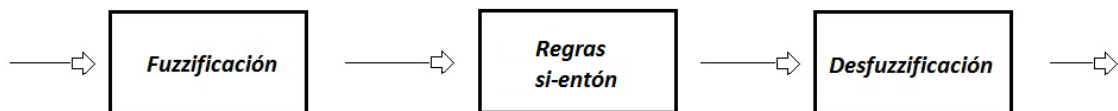
Unha **función membro** é unha curva que asocia aos valores dunha variable de entrada

uns valores de pertenza comprendidos entre 0 e 1. A Fuzzy Logic Toolbox de Matlab inclúe varios tipos de funcións membro, desde funcións lineais ata distribucións gaussianas ou curvas polinómicas. O rango dos valores de entrada denomínase universo do discurso.

Os **operadores lóxicos** difusos teñen a súa equivalencia cos operadores lóxicos clásicos AND, OR E NOT. Considerando dúas variables A e B, cuxos valores están limitados a un rango entre 0 e 1, a operación lóxica A AND B equivale á función $\min(A,B)$, que toma o valor mínimo de A e B. A operación A OR B correspóndese co máximo de ambos valores, é dicir, coa función $\max(A,B)$. Para rematar, a operación NOT A é equivalente a $1-A$, é dicir, todos os valores do universo de discurso excepto os da variable A. En resumo, os correspondentes operadores difusos para os operadores clásicos intersección (AND), unión (OR) e complemento (NOT) son, respectivamente, os operadores mínimo, máximo e complementario.

As **regras** de actuación se-entón (if-then) son declaracións condicionais da forma “se X é A entón E é B”, onde A e B son valores lingüísticos definidos por conxuntos difusos pertencentes ao universo do discurso de X e E. A parte “X é a A” denomínase antecedente, mentres que “E é a B” denomínase conseqüente. A interpretación da regra “se-entón” implica a avaliación do antecedente, e a aplicación dese resultado ao conseqüente.

A partir destes tres elementos, o proceso de avaliación dun sistema borroso pódese dividir en tres partes. Na Imaxe 10 podemos ver o proceso de funcionamento.



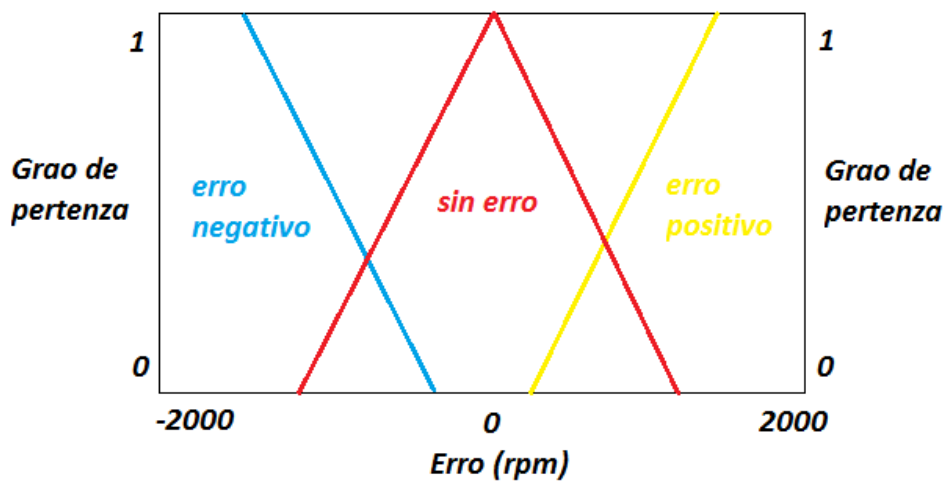
Imaxe 10 Proceso de funcionamento de un controlador borroso

As entradas do proceso son valores numéricos exactos, pertencentes a unha variable, que adoitan vir da medida dos sensores. Estas entradas son transformadas en variables lingüísticas con grados de pertenza entre 0 e 1 a funciónelas membro. A este proceso denomínaselle “fuzzificación”. Os valores de entrada de carácter lingüístico son avaliados mediante as regras borrosas si-entón e dan lugar, á súa vez, a saídas de tipo lingüístico. Os valores de saída numéricos e exactos obtéñense a continuación mediante o proceso de “defuzzificación”.

O proceso de “defuzzificación” pódese levar a cabo mediante diferentes métodos. O máis empregado, que é o que se aplicou neste traballo, é o método do Centro de Gravidade. Cada unha das regras de inferencia asocia, a un conxunto de inputs de carácter lingüístico, un grado de pertenza aos conxuntos borrosos das saídas. O resultado concreto depende conxuntamente de todas as regras. O método do centro de gravidade determina a posición do centro de gravidade da área que representa o grao de pertenza aos conxuntos borrosos de saída.

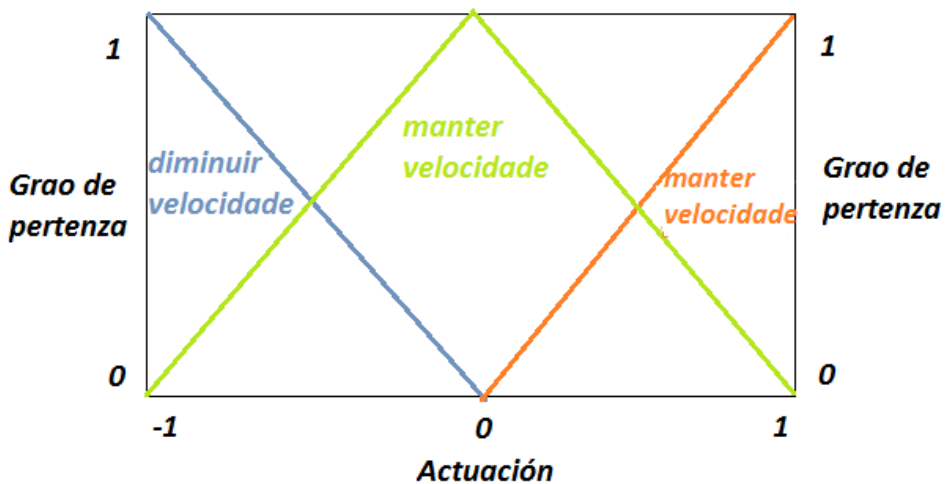
Para entender mellor o funcionamento dun controlador borroso ímonos basear nun exemplo sinxelo. Supoñamos que temos un motor eléctrico que nos interesa manter a unhas determinadas revolucións por minuto. Para realizar o controlador suscítase como variable de entrada ao controlador a diferenza entre as rpm desexadas e as rpm actuais do motor en revolucións por minuto (rpm); e como variable de saída, a variación do sinal que alimenta ao motor eléctrico.

Defínense uns sinxelos conxuntos borrosos asociados a cada unha destas dúas variables. A entrada ao controlador, neste caso o erro entre o valor desexado e o valor medido a partir do sensor correspondente aválíase no seguinte conxunto borroso da Imaxe 11.



Imaxe 11 Conxunto borroso da entrada de datos do controlador

O conxunto borroso da saída do controlador será o da seguinte Imaxe 12.



Imaxe 12 Conxunto borroso da saída de datos do controlador

A saída do controlador, será un valor entre -1 y 1, así teremos a opción de axustar a saída do controlador multiplicando con un parámetro "k" en vez de facelo no eixe de abscisas do propio conxunto borroso. Mentres que as regras de lóxica borrosa que se van empregar son as seguintes:

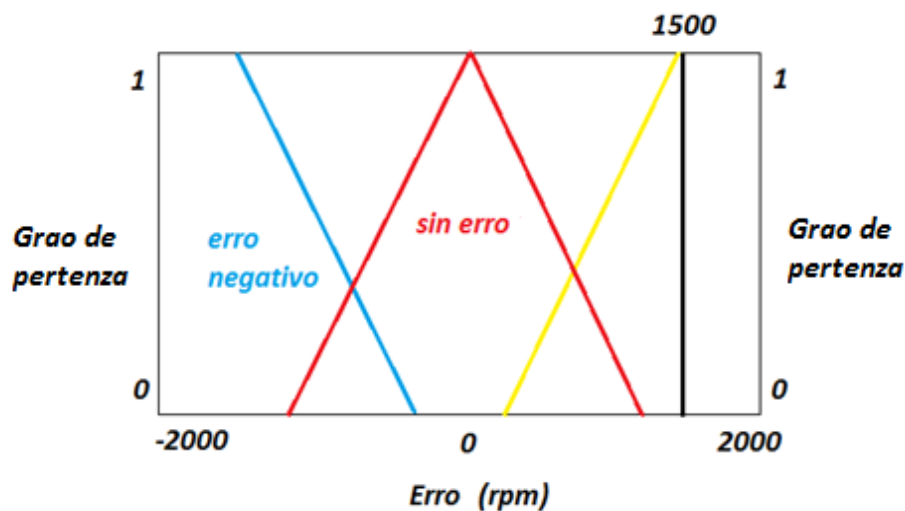
1. SE (erro é “erro negativo”) - ENTÓN diminuír a velocidade do motor
2. SE (erro é “sen erro”) – ENTÓN manter velocidade do motor
3. SE (erro é “erro positivo”) – ENTÓN incrementar velocidade do motor

Como pode apreciarse, as regras son sinxelas e fáciles de axustar, de recordar e de manter. Ademais, o feito de que a variable de saída sexa un incremento en lugar dun valor absoluto simplifica enormemente as regras e os conxuntos.

Exemplo 1:

Supoñamos que queremos alcanzar unha velocidade de 2000 rpm e que a velocidade actual medida polo correspondente sensor de velocidade é de 500 rpm. O erro será, xa que logo, 1500 rpm. O primeiro que se fai é transformar o sinal de entrada en variable lingüística con grados de pertenza entre 0 e 1 (“fuzzificación”).

Para a expresión “erro é erro negativo” calcúlase o grao de pertenza de 1500 rpm ao conxunto borroso “erro negativo” ; para a expresión “erro é sen erro” calcúlase o mesmo grao de pertenza anterior ao conxunto borroso “sen erro”; e finalmente, para “erro é erro positivo” calcúlase ao conxunto borroso “erro positivo”. Isto móstrase na Imaxe 13.



Imaxe 13 Grao de pertenza en función do valor de entrada

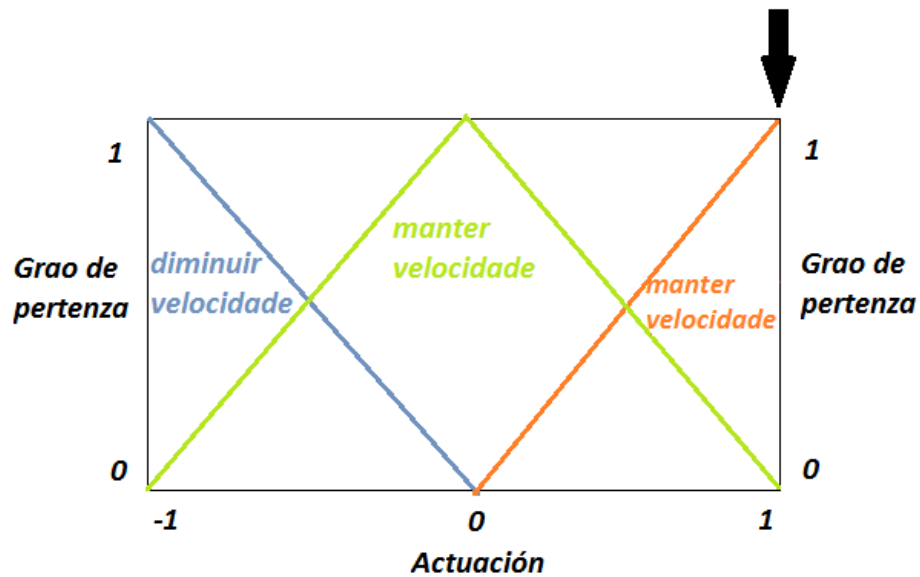
Conxuntos borrosos da entrada	Grao de pertenza
Erro negativo (1500 rpm)	0
Sen erro (1500 rpm)	0
Erro positivo (1500 rpm)	1

Táboa 2 Grao de pertenza dos conxuntos borrosos da entrada ao control

Polo tanto, a saída será:

Conxuntos borrosos da entrada	Grao de pertenza
Diminuír velocidade	0
Manter velocidade	0
Incrementar velocidade	1

Táboa 3 Grao de pertenza dos conxuntos borrosos da saída do control



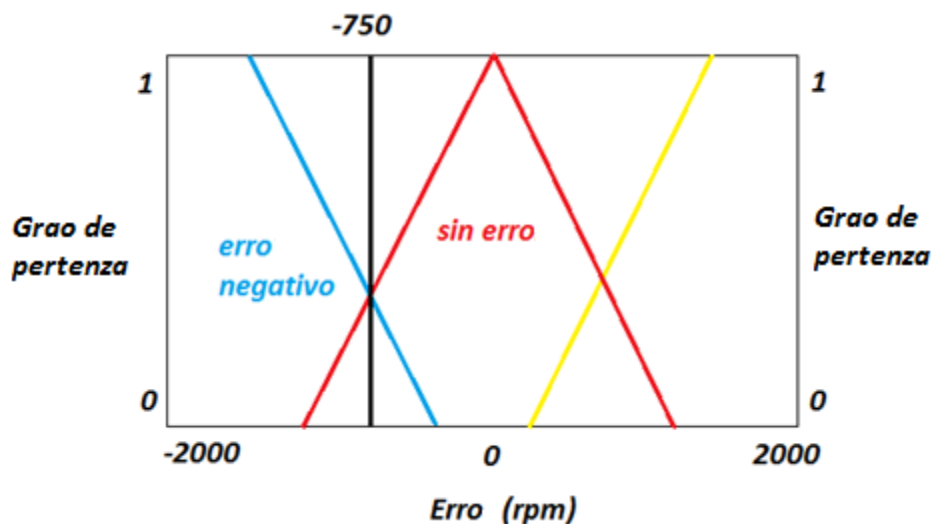
Imaxe 14 Valor da actuación en función do grao de pertenza

Neste caso el resultado é o centro do conxunto borroso “incrementar velocidade”, que na actuación vale 1 para o grao de pertenza de aumentar a velocidade.

Exemplo 2

Supoñamos agora que queremos alcanzar a mesma velocidade de 3000 rpm e que a velocidade actual medida po sensor de velocidade é de 3750 rpm. O erro será por tanto -750 rpm.

Calcúlense os diferentes graos de pertenza:



Imaxe 15 Grao de pertenza en función do valor de entrada

Conxuntos borrosos da entrada	Grao de pertenza
Erro negativo (-750 rpm)	0.5
Sen erro (-750 rpm)	0.5
Erro positivo (-750 rpm)	0

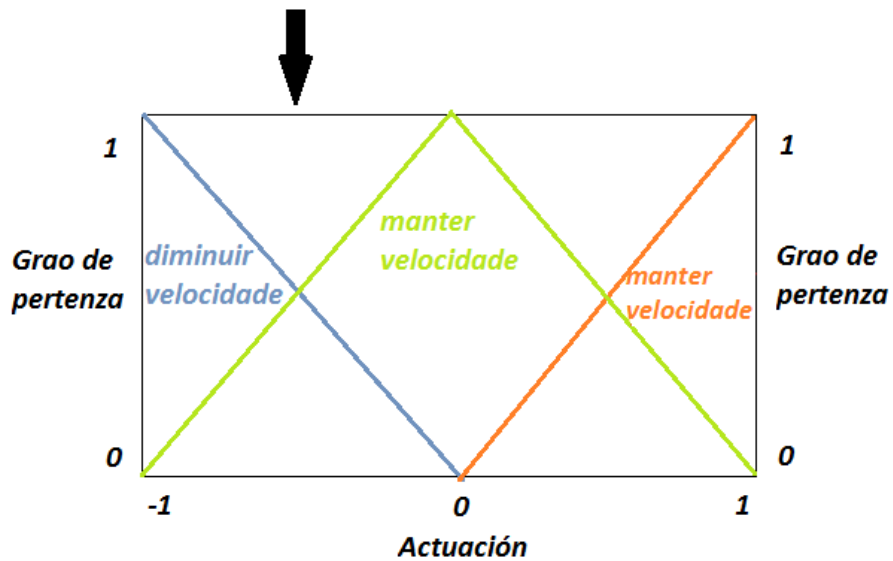
Táboa 4 Grado de pertenza dos conxuntos borrosos da entrada ao control

Por tanto, a saída será:

Conxuntos borrosos da saída	Grao de pertenza
Diminuír velocidade	0.5
Manter velocidade	0.5
Incrementar velocidade	0

Táboa 5 Grado de pertenza de los conxuntos borrosos de la saída del control

Un valor de -0.5 na saída do controlador que alimenta o motor, diminúe dito valor e, por tanto, fai que diminúa a velocidade do motor.



Imaxe 16 Valor da actuación en función do grao de pertinenza

O control borroso ten sido aplicado con éxito en moitas ramas tecnolóxicas, por exemplo a metalurxia, os robots de fabricación, controis de manobra de avións, ascensores ou trens (tren-metro de Sendai, Xapón, 1987), sensores, e y son (sistema de estabilización de imaxe en cámaras fotográficas e de vídeo *Sony, Sanyo, Canon...*), electrodomésticos (lavadoras de *Panasonic* ou *Bosch*, aire acondicionado *Mitsubishi, ricecooker...*), automoción (sistemas de *ABS* de *Mazda* ou *Nissan*, cambio automático de *Renault*, control automático de velocidade, climatizadores...) e unha longa lista de aplicacións comerciais.

3. O prototipo

Como comentamos no primeiro capítulo, deseñáronse condutores virtuais baseados nos controladores PID e Fuzzy explicados no capítulo 2, co obxectivo de implementalos nun vehículo real. Aplicalos directamente nun vehículo real é verdadeiramente complicado, primeiro probáronse no seu simulador.

3.1 O prototipo real

A principal función do prototipo real é facilitar a realización das probas necesarias para a investigación. Desde este punto de vista, os requirimentos do prototipo son un baixo custo e flexibilidade de uso, de forma que poida instrumentarse con facilidade, que se poidan instalar os sensores oportunos en cada ocasión sen atopar limitacións de accesibilidade, espazo, e poder realizar modificacións estruturais con facilidade. Estas características son máis fáciles de reunir nun prototipo novo que nun vehículo comercial.

O prototipo atópase no *Edificio de Talleres Tecnolóxicos do Campus de Esteiro (Ferrol)* da *Universidade da Coruña*. O chasis do vehículo foi fabricado mediante soldadura de tubos de aceiro, mentres que os distintos compoñentes (motor, dirección, suspensións, rodas, etc.) recolléronse do desguace e foron adaptadas convenientemente.



Imaxe 17 O prototipo real

Bastidor

O chasis é a estrutura principal, e como se aprecia na Imaxe 17, é unha estrutura de tubos de aceiro soldados. Fabricouse basicamente con tubería de aceiro DIN 2440. A súa construción levouse a cabo no taller de caldeirería especializado *INTAF S.L.*, que amablemente se prestou a colaborar neste traballo. As propiedades do material son: densidade, $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$, módulo de elasticidade, $E = 2.1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, e coeficiente de Poisson, $\nu = 0.30$.

O bastidor constitúe a base do chasis, no que se suxeitan os distintos mecanismos. O chasis está sometido a continuos esforzos de flexión durante os procesos de aceleración e deceleración do vehículo. Tamén debe soportar esforzos de torsión cando o vehículo circula por estradas de firme irregular ou nas curvas.

Motor

A motorización do prototipo seleccionouse coa vista posta no accionamiento automático. Manexar un motor de cambio automático, no que ata é posible deter totalmente o vehículo sen necesidade de alterar a posición da palanca de cambios, simplifica o sistema de actuadores que debemos instalar no vehículo.

Sistema de freos

O sistema de freos consiste nun dobre circuíto dianteiro e un traseiro, conectados a unha bomba de accionamiento mecánico directo que fornece presión ao circuíto hidráulico. Os freos empregados nas catro rodas son de disco.

Suspensión

O sistema de suspensión é diferente no tren dianteiro que no tren traseiro, xa que no noso caso o reparto de peso do vehículo é moi desfavorable para o tren dianteiro. Interesa que o tren dianteiro sexa menos ríxido que o tren traseiro para que a frecuencia de vibración de ambos sexa similar; ao ter máis masa detrás, o sistema está máis equilibrado se o resorte nesta parte é máis ríxido.

Dirección

Inicialmente o sistema de dirección compoñíase de cremalleira, columna de dirección e bieletas, pero elimináronse, e montouse un sistema de dirección por cable para que se poidan controlar cun condutor virtual.

Masas, centro de gravidade e inercias

A masa total do prototipo é de 363.5 Kg. A posición do centro de gravidade do chasis obtívose a partir da modelización gráfica do vehículo, e igualmente os seus momentos e produtos de inercia. Con todo, para obter os datos referentes ao motor, foi necesario suspendelo dun guindastre, colgándoo en diversas posicións. En cada posición de equilibrio, marcouse cun xiz unha recto vertical que pasase polo punto de suxeición. O centro de gravidade localizouse na intersección dos segmentos marcados.

Para obter os momentos de inercia, unha vez calculada a situación do centro de gravidade, fíxose balancear o motor, colgándoo de tal xeito que se recollesen os distintos planos. Medindo os períodos de oscilación, puidéronse aproximar os valores dos momentos de inercia a partir da expresión:

$$I_o = \frac{Mg\overline{OGT}^2}{4\pi^2} \quad (5)$$

Onde \overline{OG} é a lonxitude desde o punto de xiro ata o centro de gravidade e T o período das oscilacións.

Variables	x_{CDG}	y_{CDG}	z_{CDG}	I_x	I_y	I_z	I_{xy}	I_{xz}	I_{yz}
Unidades	(m)			(kg m ²)					
Bastidor	0.164	0.012	0.288	20.56	66.58	61.89	0.985	-2.187	0.079
Grupo motor	-0.620	0.000	0.300	14.80	6.00	12.10	0.00	0.00	0.00

Táboa 6 Coordenadas do centro de gravidade e inercias dos elementos principais.

3.2 O modelo virtual do prototipo real

A partir do prototipo real mostrado no anterior apartado tamén debemos destacar que existe un prototipo virtual deste para facer as simulacións oportunas en ordenador. Este prototipo virtual é unha representación exacta do prototipo real e está escrito en linguaxe Fortran describindo ao vehículo como un sistema multicorpo.

A posición de cada elemento do prototipo virtual defínese por medio de coordenadas cartesianas de puntos situados nos pares cinemáticos do sistema, e por medio de compoñentes cartesianos de vectores unitarios situados tamén nos pares. Cada elemento precisa dun número mínimo de puntos e/ou vectores unidos a el, de maneira que devanditos puntos e vectores definan completamente o movemento do elemento. Polo tanto, se os puntos e vectores dos pares non son suficientes, é preciso engadir outros puntos e/ou vectores nos elementos que non queden ben definidos. A modelización en coordenadas naturais adoita suscitar ecuacións de restrición de sólido ríxido entre os puntos e vectores empregados na modelización dun elemento. As

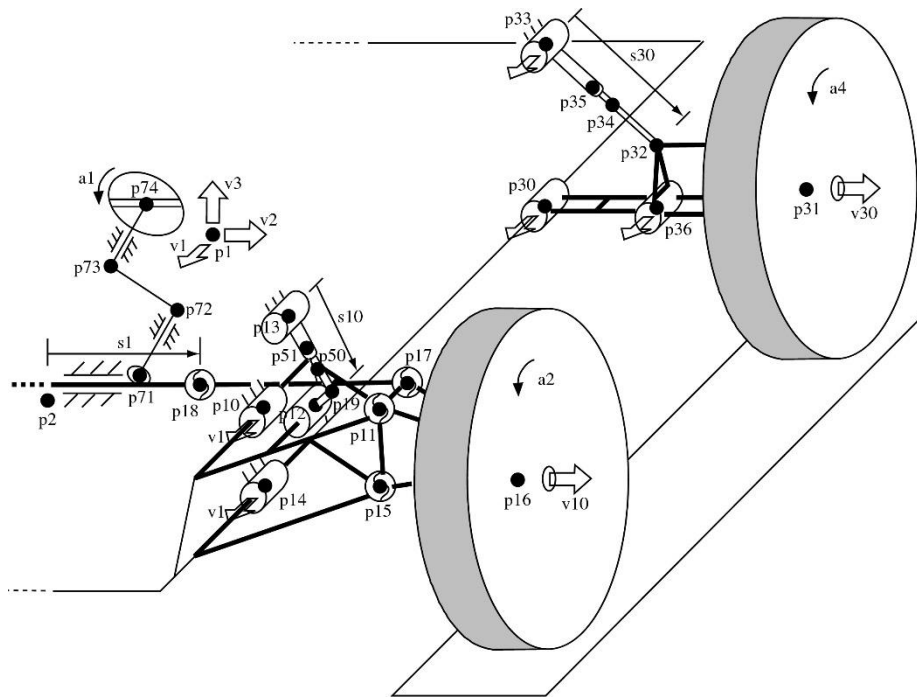
coordenadas destes puntos e vectores non son, en xeral, independentes, e para modelizar un único sólido ríxido en coordenadas naturais é necesario introducir ecuacións de restrición. Outras ecuacións de restrición serán as encargadas de establecer os pares cinemáticos que unen os distintos elementos do sistema multicorpo. O resultado adoita ser un problema cun gran número de variables, e un gran número de restricións que ligan estas variables, unhas procedentes das condicións de sólido ríxido dos elementos, e outras procedentes dos pares cinemáticos presentes no mecanismo.

As vantaxes das coordenadas naturais son:

1. A súa definición é simple e sistemática.
2. Sitúan cada elemento con independencia dos demais.
3. Se se elixen un número suficiente de puntos e vectores para modelizar os elementos, as súas matrices de masas son constantes.
4. As ecuacións de restrición son sinxelas e fáciles de establecer: adoitan ser funcións lineais ou como máximo cuadráticas das variables, e non aparecen funcións trigonométricas.
5. A interpretación dos resultados é sinxela, posto que se trata de coordenadas cartesianas de puntos e vectores unitarios.

No caso do modelo virtual do prototipo, o conxunto do vehículo implementouse en coordenadas naturais mediante 44 puntos, 7 vectores unitarios (unha base ortonormal unida ao chasis e cada un dos vectores perpendiculares aos planos das rodas), 5 distancias (unha para representar o alongamento de cada un dos amortiguadores, e outra que recolle o desprazamento da barra de dirección) e 5 ángulos (que describen o xiro do volante e o xiro das catro rodas). Para simplificar o problema, o xiro do volante ligouse directamente co desprazamento da dirección mediante unha restrición. Deste xeito, evitouse a modelización detallada da cadea do volante. O número total de variables do problema é 163.

Na Imaxe 18 pódese ver un esquema da modelización que se desenvolveu. Para maior claridade móstrase soamente a metade do vehículo.



Imaxe 18 Esquema do modelo virtual do prototipo

Para completar a modelización, suscítáronse 161 ecuacións de restrición e contempláronse 15 grados de liberdade do sistema: a posición e orientación do chasis, o xiro do volante, a coordenada vertical do centro de cada unha das rodas, e o xiro de cada unha das rodas.

Para a realización deste traballo, as coordenadas principais que hai que ter en conta son:

- O punto p1 que pertence ao centro de masas do vehículo, que empregaremos para calcular o erro en posición, o cal tomaremos de referencia para actuar en consecuencia e para realizar o cálculo de resultados ao longo da simulación.
- O vector v1, que indica a dirección e sentido de avance do vehículo, que se empregará, xunto coa tanxente do circuíto, para calcular o erro angular.
- Os puntos p16 e p31 corresponden ao centro de masas da roda dianteira e traseira respectivamente.
- Os vectores v10 e v30 son os vectores que definen o plano vertical da roda dianteira e traseira respectivamente. As súas coordenadas, xunto cos puntos p16 e p31, utilizaranse para obter datos e conclusións coa fin de mellorar o control do xiro do volante.

4. Simulacións e resultados

4.1 Introducción

A simulación é unha técnica numérica para realizar e analizar experimentos nunha computadora dixital. Estes experimentos comprenden certos tipos de relacións matemáticas e lóxicas, as cales son necesarias para describir o comportamento e a estrutura de sistemas complexos do mundo real a través de longos períodos de tempo. Coa chegada da computación, a simulación é unha das ferramentas máis importantes para analizar o deseño e operación de sistemas.

Aínda que a construción de modelos arrinca no Renacemento, o uso moderno da palabra simulación data de 1940, cando os científicos Von Neuman e Ulam, que traballaban no proxecto Monte Carlos durante a Segunda Guerra Mundial, resolveron problemas de reaccións nucleares cuxa solución experimental sería moi cara e a análise matemática demasiado complexa.

As vantaxes de empregar unha simulación son verdadeiramente amplas, por exemplo:

- A través dun estudo de simulación, pódese estudar o efecto de cambios internos e externos do sistema, ao facer alteracións no modelo do sistema e poder observar os efectos desas alteracións no comportamento do sistema.
- Unha observación detallada do sistema que se está simulando pode conducir a un mellor entendemento do sistema e por conseguinte a suxerir estratexias que melloren a operación.
- A simulación de sistemas complexos pode axudar a entender mellor a operación do sistema, a detectar as variables máis importantes que interactúan no sistema e a entender mellor interrelaciónelas entre estas variables.
- A técnica de simulación pode ser utilizada para experimentar con novas situacións, sobre as cales ten pouca ou ningunha información. A través desta experimentación pódense anticipar mellor posibles resultados non previstos.
- Cando novos elementos son introducidos nun sistema, a simulación pode ser empregada para anticipar pescozos de botella ou algún outro problema que pode xurdir no comportamento do sistema.

As áreas de aplicación da simulación son moi amplas, numerosas e diversas. Neste caso, propónse abordar o deseño de controladores para vehículos con condutores virtuais mediante a simulación, xa que logo, que o vehículo realice autonomamente o trazado dun circuíto. O simulador facilita o deseño destas manobras.

4.2 Desenvolvemento do programa

Co obxectivo de familiarizarse co funcionamento dos controladores, mediante o programa *Matlab*, simularemos o comportamento dunha masa puntual que circula ao longo dunha recta. Cun erro inicial de partida, debemos lograr que esta masa consiga seguir a traxectoria e para iso actuarase con forzas en función do erro captado ao longo da simulación.

Para comezar primeiro decidiuse crear unha simulación dun sólido lanzado cunha posición de partida e velocidade inicial baixo o efecto da gravidade; a hipótese é que isto crearía unha traxectoria particular, neste caso unha parábola.

Para que funcione a simulación debemos inicializar datos, como o valor de posición, de velocidade, gravidade ou paso de tempo. O valor do paso de tempo é unha variable que debemos ter en conta na simulación, xa que canto máis pequeno sexa, máis precisa será a simulación, pero coa desvantaxe do alto custo computacional. Debemos atopar un equilibrio para ter unha simulación óptima e para iso axustaremos o valor do paso de tempo ata o punto no que a súa diminución non cambie os valores obtidos do sistema; neste caso, que o erro sexa igual nun caso que no outro.

Posteriormente, para a representación da simulación créase un bucle, nel representamos a posición da masa puntual en cada paso de tempo. Nesta parte do código tamén actualizamos os valores de posición e velocidade mediante o sistema de integradores. Os integradores son necesarios para recalcular as características do sólido ao longo da simulación, e neste caso decidimos empregar un integrador *Forward Euler semi-implícito* o cal é bastante preciso cun paso de tempo pequeno, e válido para nosa simulación. O algoritmo de integración é o seguinte:

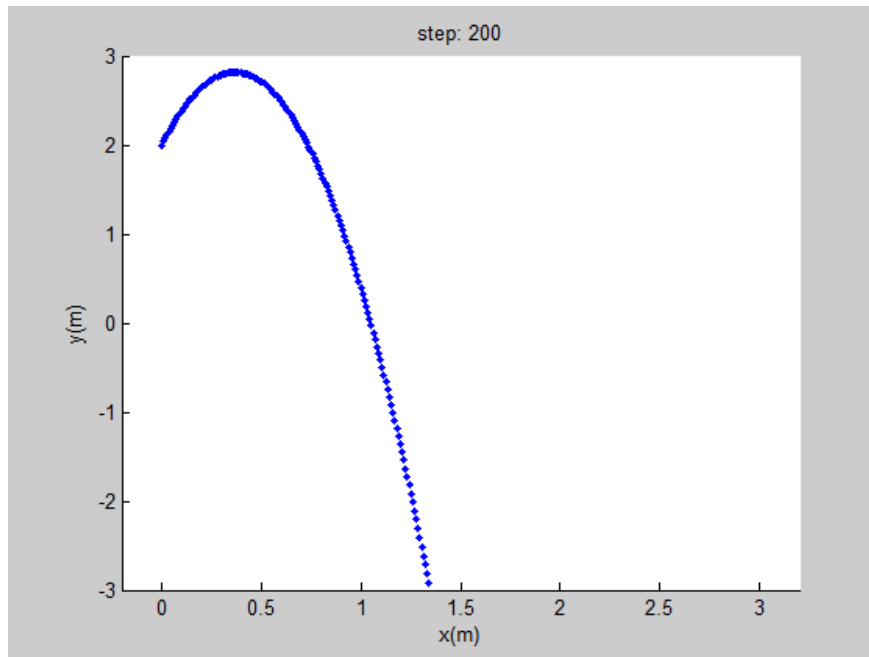
$$x(t + h) = x(t) + \dot{x}(t) \cdot h \quad (6)$$

Onde:

- x é o vector de estados, no noso caso pode ser a posición da masa puntual en función do tempo.
- \dot{x} é a derivada de x en función do tempo, e neste caso sería a velocidade da masa.
- h é o paso de tempo.

Os sumandos que se atopan á dereita da igualdade serían a posición actual, e a velocidade polo paso de tempo actual do punto; o sumando da esquerda a nova posición da masa.

Validouse a dinámica do código, xa que a traxectoria que describe a masa é a parábola dun tiro parabólico mostrado na Imaxe 19. A continuación, avanzamos ao seguinte paso e base do que necesitamos: o seguimento dun sólido ao longo dunha liña recta.



Imaxe 19 Traectoria descrita por unha masa puntual ao longo dunha simulación

4.3 Liña recta

Seguindo os pasos da simulación anterior imos realizar a simulación do sólido ao longo dunha recta. Primeiro inicializamos todas as variables de entrada, como son: masa do sólido, velocidade inicial, posición inicial, etc.

A continuación, debemos definir o erro do sólido con respecto á referencia (neste caso a recta) e actuar en consecuencia. En función da magnitude do erro actuaremos cunha forza na dirección perpendicular cara ao punto da recta máis próximo ao sólido para diminuír o erro. A definición do erro sería a distancia mínima que hai entre a posición do sólido á recta. Como a recta a debuxamos ao longo do eixe “x” e horizontal, o erro será a coordenada “y” do propio sólido.

Obviamente, en cada paso de tempo o valor do erro será diferente, e polo tanto, o valor da forza tamén. O valor fixo ao longo da simulación será o das ganancias que se irán cambiando ao longo das simulacións para mellorar o sistema segundo as nosas necesidades. O axuste da ganancia vai modificándose e mellorando o seu punto óptimo a partir dos datos obtidos unha vez finalizada a simulación, como poden ser o erro en posición ao longo da simulación ou o módulo da velocidade.

Como comentamos no apartado 2 deste traballo, empregaranse dous tipos de controladores nestes ensaios: o controlador *PID* e o controlador *de Lóxica Borrosa*, polo que se irán engadindo distintos tipos de variables ao longo do traballo.

4.3.1 Control proporcional

A primeira simulación importante que temos que implementar é a actuación dun controlador proporcional. A actuación réxese en función deste erro e unha constante proporcional para axustar o sistema segundo as necesidades. Así, o resultado será:

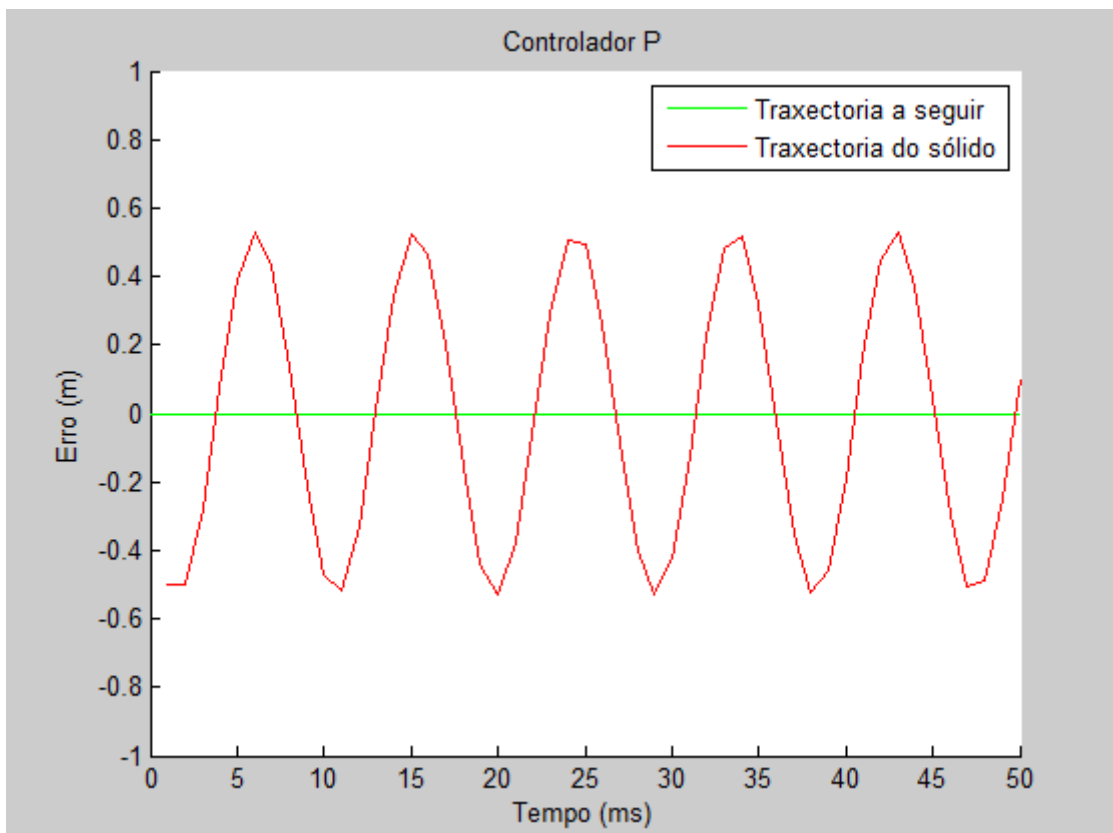
$$F = K_p \cdot e \quad (7)$$

Onde:

- F : é a forza actuante
- K_p : é a ganancia do sistema
- e : erro que hai no sistema

As condicións iniciais nesta simulación son: velocidade inicial do sólido de 20 m/s, masa de 1000 kg, paso de tempo de 0.01 s na simulación. Todas estas condicións iniciais empregaranse nas simulacións de Matlab posteriores. A ecuación pola que se rexe a súa dinámica é a segunda Lei de Newton:

$$F = ma \quad (8)$$



Imaxe 20 Traxectoria do sólido ao longo da simulación fronte á traxectoria a seguir cun controlador P

A actuación sobre o sólido varía ao longo do tempo, a pesar do cal se percibe claramente que é un sistema oscilante; isto é lóxico, xa que se parte dun erro inicial, e tamén porque

A duración da simulación será de 50 s xa que é un intervalo máis que suficiente para ver o comportamento do sólido cunha ganancia do controlador proporcional de 9 e5. O valor da súa posición ao longo do tempo pódese ver na Imaxe 20. O sistema carece de amortiguamento. Ten un erro máximo de 0.5 m a cada lado da referencia, valor igual ao erro inicial.

O control non é óptimo, tense que buscar unha mellora, xa que logo, engadiremos ao término proporcional un término derivativo.

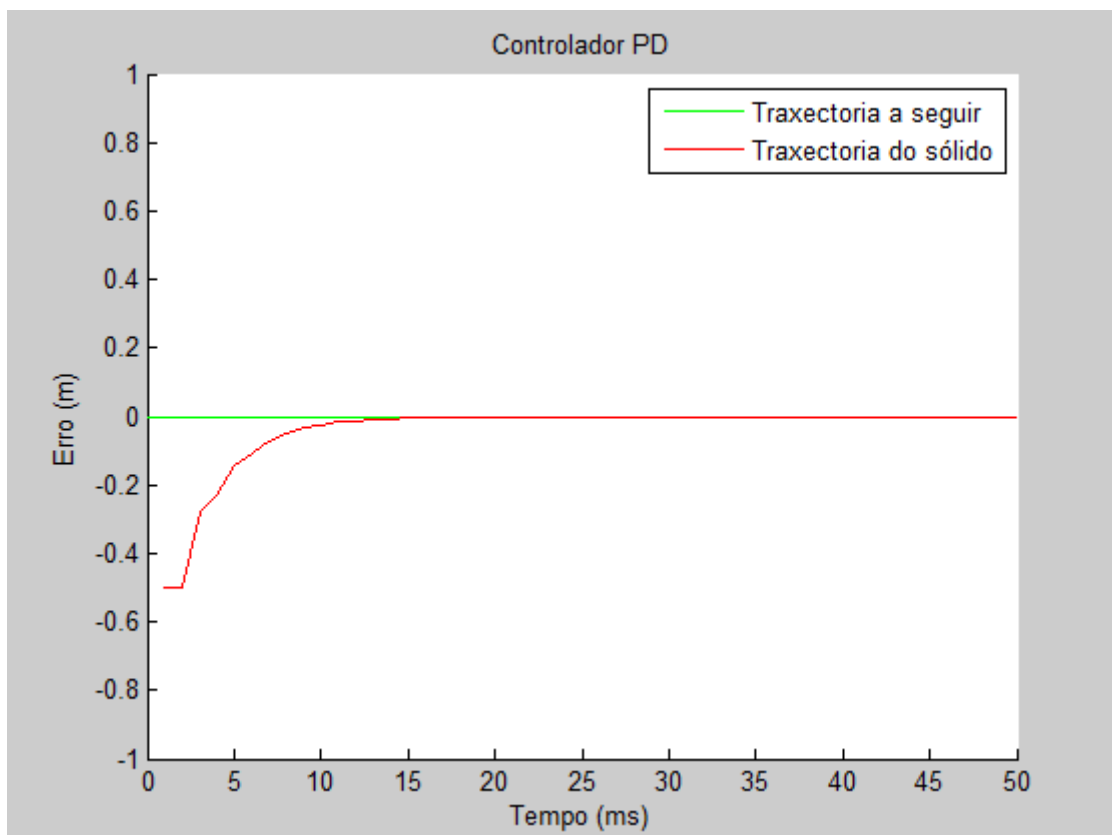
4.3.2 Control proporcional-derivativo

Como comentamos anteriormente, para mellorar o control engadiremos un derivador no sistema, que fai efecto de amortiguador, tendo así capacidade de anticipación. A forza actuante no controlador PD será o seguinte:

$$F = K_p \cdot e + K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (9)$$

Onde:

- K_d : é a ganancia derivativa do sistema
- de/dt : é a derivada do erro con respecto ao tempo



Imaxe 21 Traxectoria do sólido ao longo da simulación fronte á traxectoria a seguir cun controlador PD

A ganancia proporcional é igual á do apartado anterior ($9 \cdot 10^5$) e a ganancia derivativa é $7.2 \cdot 10^6$. O sólido estabilízase no punto de referencia ao cabo duns segundos. Esta rapidez varía segundo o axuste da ganancia proporcional e a ganancia derivativa. O resultado da actuación PD podemos ver na Imaxe 21.

O comportamento do sólido mellora considerablemente e convértese nun sistema estable e rápido de resposta sen erro permanente. O sistema neste caso é ce masa-resorte-amortiguador; é un sistema coñecido, sabemos as ecuacións polas que se rexe o sistema, xa que logo non ten sentido engadir un compoñente integrador.

Estes exemplos son unha toma de contacto, posto que o comportamento dun vehículo real difire moito do comportamento dunha masa puntual, ademais, na estrada hai un conxunto de curvas e rectas, polo que debemos analizar o comportamento do sistema nun tramo con curvaturas.

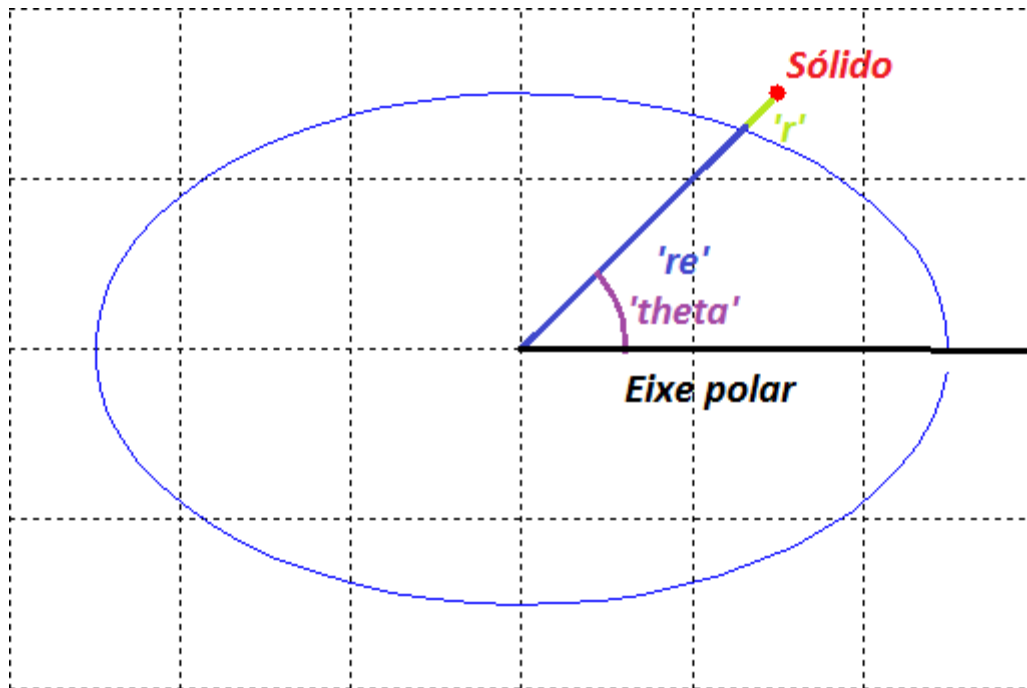
4.4 Elipse

4.4.1 Descrición

O exemplo que queremos experimentar é o comportamento do sólido en zona curva. Para iso impoñerémolle o seguimento ao longo dunha elipse de semieixes a e b , de 5m. e 3m. respectivamente.

O sistema de coordenadas empregado neste exemplo serán as coordenadas polares, xa que nos facilita a maneira de medir o erro. As coordenadas polares son en radio r que é a distancia en liña recta da orixe das coordenadas ao punto do espazo no que se encontra o sólido e o ángulo θ , e trátase do ángulo ao que se encontra este punto con respecto ao eixo polar (eixo ' x ' do sistema coordenadas cartesiano). Na Imaxe 22 faise unha representación destas variables.

Por tanto o erro tomado neste caso será a diferenza entre a coordenada r do sólido e a coordenada chamada r_e , que é a distancia ao trazado da elipse para o mesmo ángulo θ anterior.



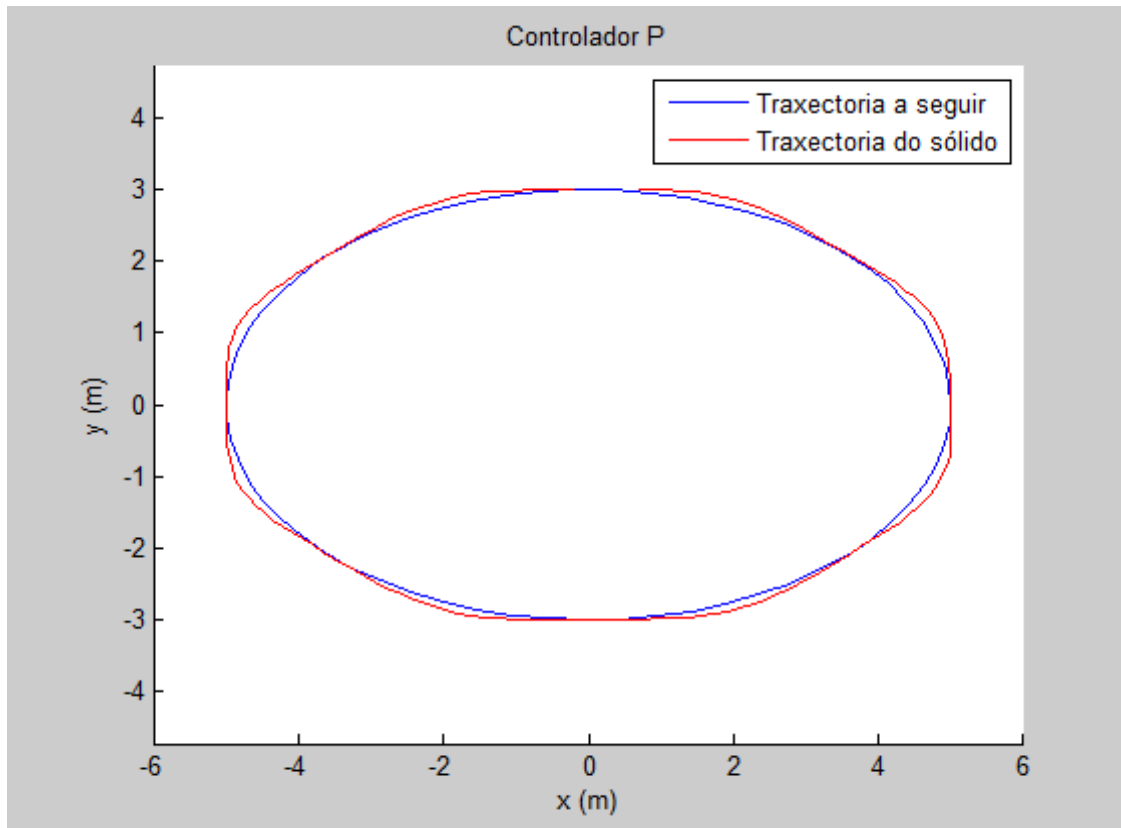
Imaxe 22 Representación das variables para a descrición do erro no sistema

Unha vez coñecido o sistema, o seguinte é implementar a actuación. Realizáronse tres probas: actuación P, PD e PID.

4.4.2 Control proporcional

As condicións iniciais son as mesmas que no apartado da simulación na recta, a duración é de 2 s, que é o tempo que necesita para completar a volta á elipse. O control ten unha ganancia proporcional de 9×10^5 .

A actuación do control será igual ao control P do exemplo da recta. O resultado obtido nunha volta é o da Imaxe 23.



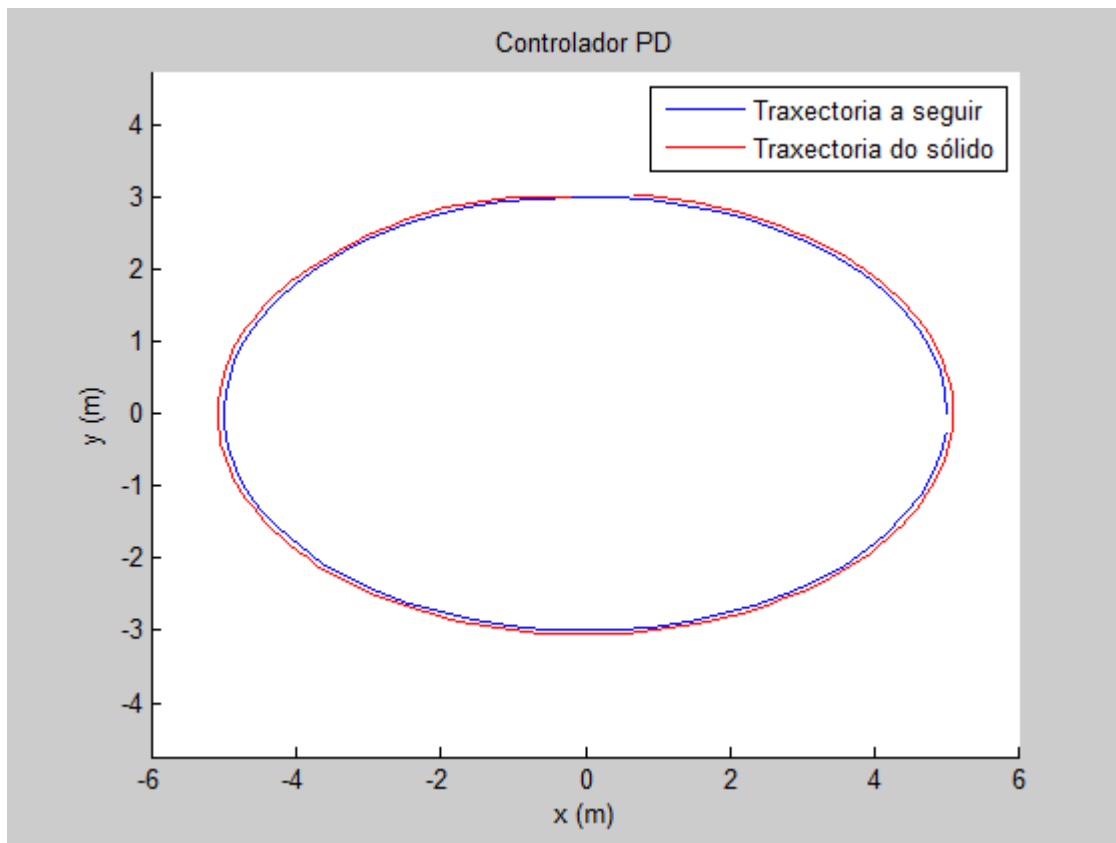
Imaxe 23 Trajectoria do sólido ao longo da elipse fronte á trajectoria a seguir cun controlador P

O sólido ten as súas desviacións intermitentes, xa que logo non é perfecto o seu seguimento. A trajectoria descrita pola masa ten que mellorar, e para iso imos engadir un termo derivativo.

4.4.3 Control proporcional-derivativo

Como dixemos anteriormente, o control será un PD, similar ao control PD da recta, coas mesmas ganancias proporcional e derivativa ($9 \cdot 10^5$ e $7.2 \cdot 10^6$ respectivamente). A trajectoria obtida móstrase na Imaxe 24.

Co controlador proporcional-derivativo o control reduce as oscilacións ao longo da elipse, de maneira que o seguimento é máis estable e máis preciso. O sólido parece que está en equilibrio, pero segue habendo un pequeno erro permanente. Para ter un mellor control debemos anular este defecto.



Imaxe 24 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador PD

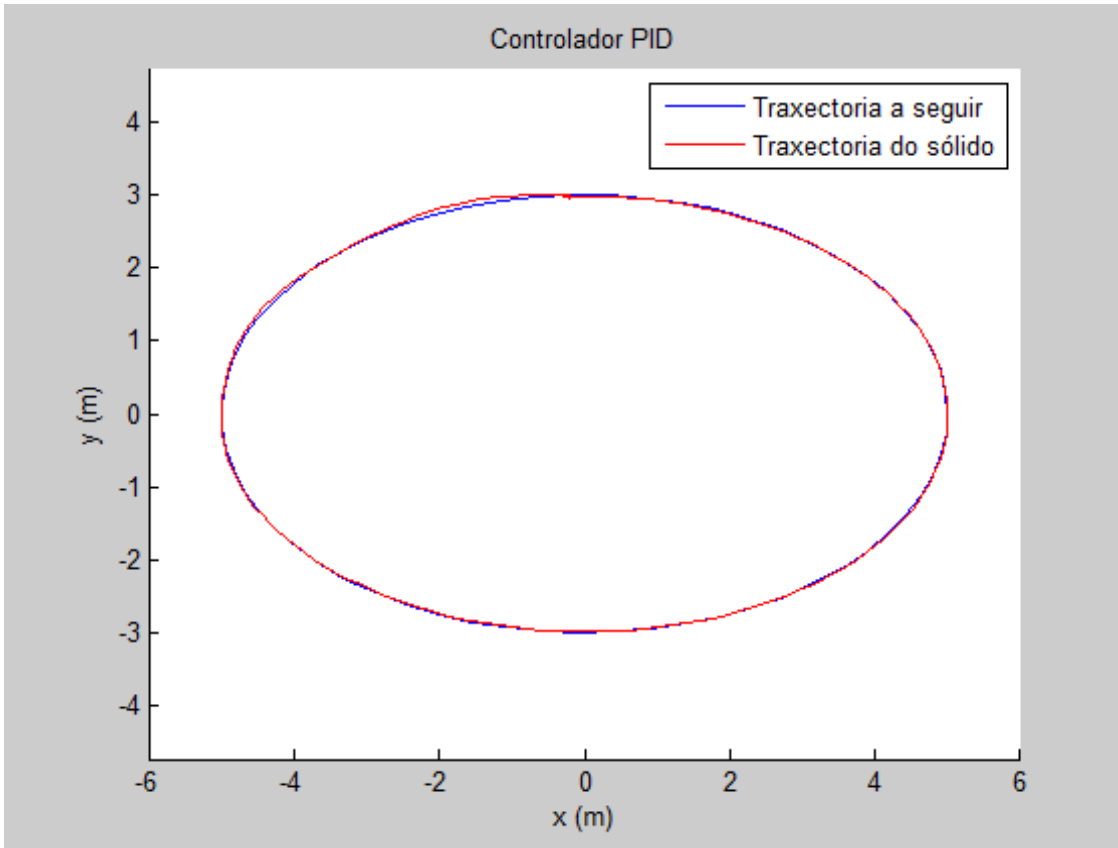
4.4.4 Control proporcional-integral-derivativo

Como sucedeu anteriormente, debemos corrixir o erro permanente. Para iso imos engadir un elemento integral ao erro, ou que é o mesmo, un controlador PID.

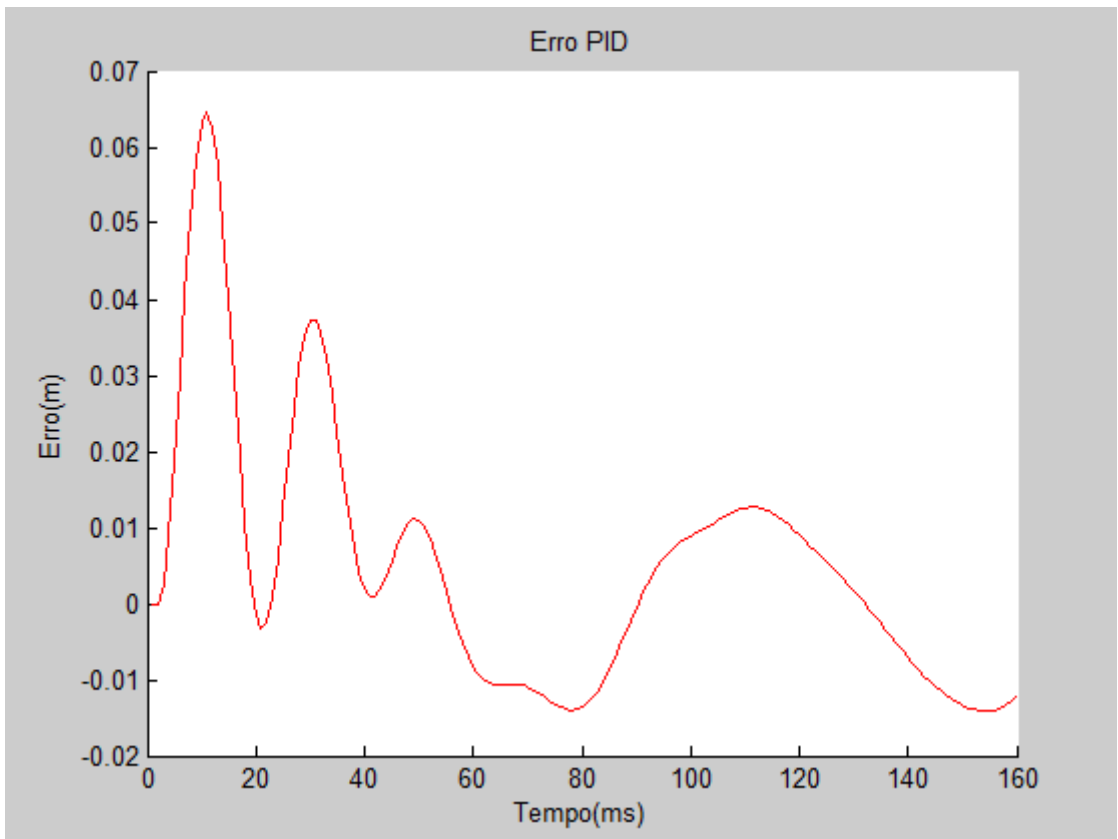
$$F = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (10)$$

Onde:

- K_p : é a ganancia proporcional do sistema
- e : é o erro que tomamos de referencia no sistema
- K_d : é a ganancia derivativa do sistema
- de/dt : é a derivada do erro
- K_i : é a ganancia integral do sistema
- $\int_0^t e(\tau) d\tau$: é a integral do erro



Imaxe 25 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador PID



Imaxe 26 Erro do sólido ao longo da simulación

Con este engadido corriximos ese erro permanente, como podemos ver na Imaxe 25 e facemos que o sistema siga perfectamente a traxectoria desexada. A ganancia integral é de 17 e^3 .

O erro residual corríxese e o vehículo segue a traxectoria que queremos. Cómpre destacar que o axuste das ganancias neste sistema realizouse polo método de Ziegler-Nichols. Na Imaxe 26 podemos ver o erro en cada paso de tempo ao longo da proba.

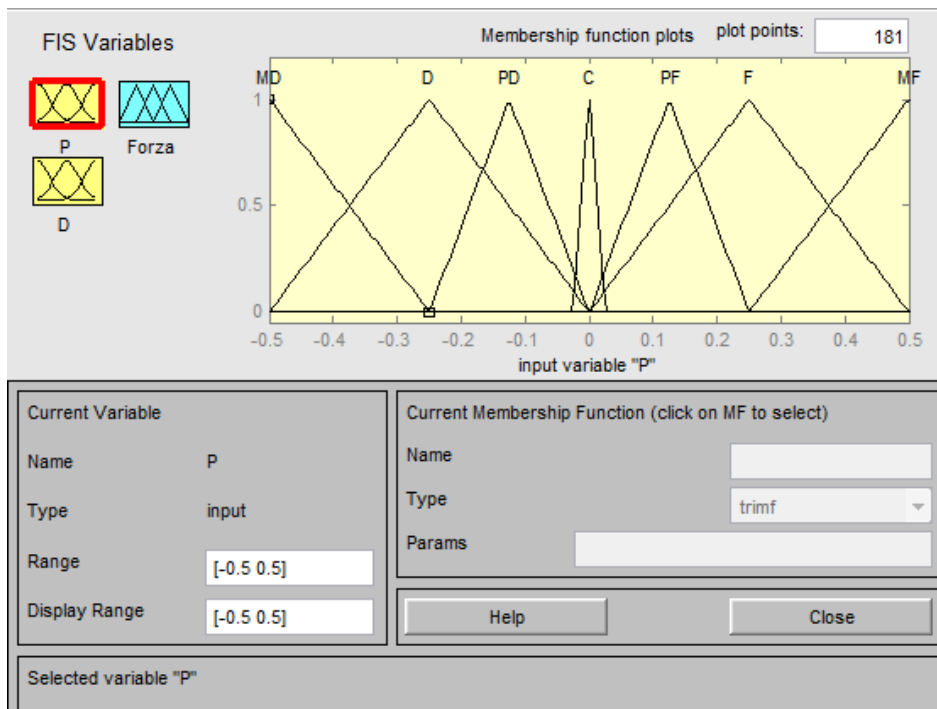
Pódese ver que o erro nunha volta pódese asumir nun sistema real, xa que o pico máximo é de 0,06 m, o que pode considerarse un valor baixo para un vehículo que circule pola estrada.

4.4.5 Control Fuzzy

É importante apreciar as posibles diferenzas que poidan existir entre un control PID e un control Fuzzy. Debido a este motivo o seguinte control será un controlador difuso con dúas entradas: a primeira, o “erro”, e a segunda, a “derivada do erro”, tal como se fose un controlador proporcional-derivativo, coa diferenza de que a actuación será diferente en función de varios condicionantes (como poden ser a creación das regras borrosas, o rango máximo de cada entrada ou os distintos conxuntos borrosos posibles).

A actuación dun controlador borroso é máis suave, continuo, e o seu axuste é máis fácil e intuitivo coa axuda da *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab. A Fuzzy Logic Toolbox proporciona un interface bastante intuitivo para o deseño de controladores. Accédese a el tecleando o comando *fuzzy* no espazo de traballo de Matlab. Os controladores deseñados son almacenados en ficheiros con extensión *.fis*. Para traballar con eles é necesario cargalos no espazo de traballo; isto realízase mediante o comando *readfis* cuxo argumento é o ficheiro que queremos cargar. Para avaliar un vector de entradas do controlador emprégase a función *evalfis*.

Unha vez abrimos o Toolbox de Matlab, xa podemos comezar a facer os conxuntos borrosos, primeiro para o erro en posición, que podemos ver na Imaxe 27 e consta de 7 conxuntos borrosos. O valor de entrada, neste caso o erro en posición, figura no eixo *x*; posteriormente asígnase a que conxuntos borrosos pertence a magnitude, para saber o grao de pertencencia de cada un no eixo *y*. O rango de valores de entrada vaise axustando segundo os resultados obtidos unha vez se van realizando as simulacións. O rango neste caso é de 0.3 m. Os erros maiores a 0.3 m penalízanse moito, xa que están fóra de rango, e iso indica que a masa puntual está demasiado fóra do trazado.

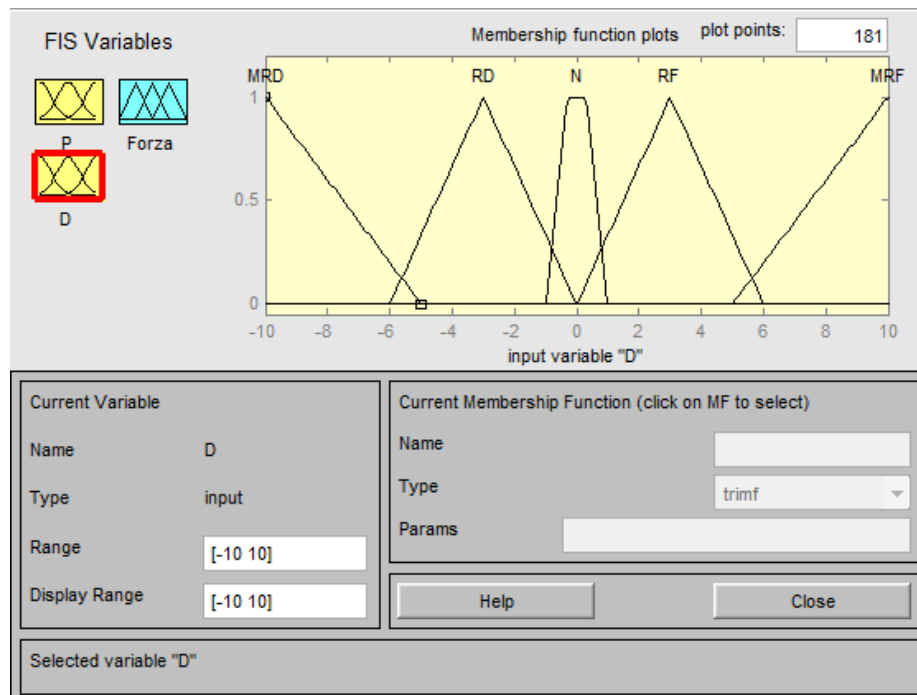


Imaxe 27 Conxunto borroso para a entrada do erro

Onde:

- MD: Moi dentro
- D: Dentro
- PD: Pouco dentro
- C: Centro
- PF: Pouco fóra
- F: Fóra
- MF: Moi fóra

O conxunto borroso da segunda entrada ao controlador é o da Imaxe 28, e é a derivada do erro en posición, que figura no eixo x ; posteriormente asígnase a que conxuntos borrosos pertence a magnitude para saber o grao de pertenza de cada un no eixe y . O rango de valores de entrada vaise axustando segundo os resultados obtidos unha vez se van realizando as simulacións. Aproxímase segundo o rango máximo de derivada de erro que ten a simulación, neste caso ata 15 m/s. Os valores maiores a 15 m/s penalízanse moito, xa que están fóra de rango, o que indica que a masa puntual se está afastando demasiado rápido do trazado. O conxunto borroso para a derivada do erro é a seguinte:

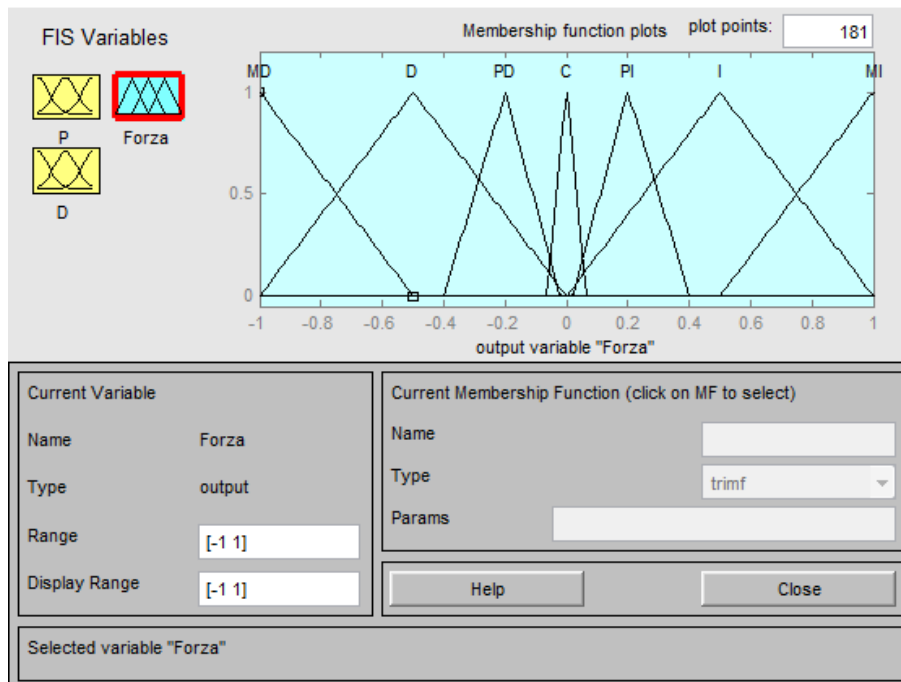


Imaxe 28 Conxunto borroso para a entrada da derivada do erro

Onde:

- MRD: Moi rápido cara a dentro
- RD: Rápido cara a dentro
- N: Normal
- RF: Rápido cara a fóra
- MRF: Moi rápido cara a fóra

E na Imaxe 29 móstranse os conxuntos borrosos para a saída do control.

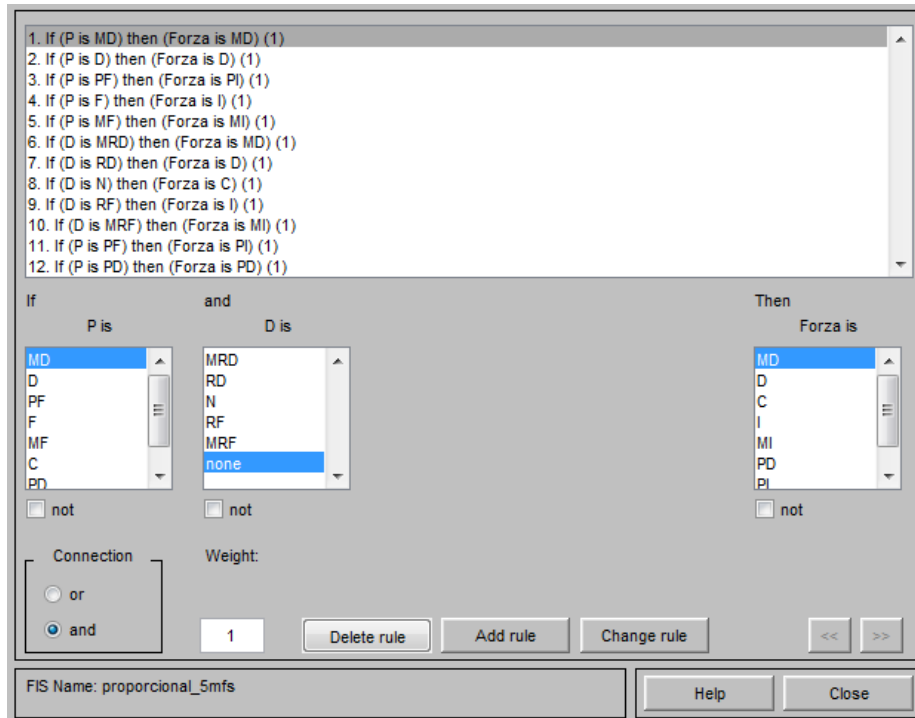


Imaxe 29 Conxunto borroso para a saída o controlador

Onde:

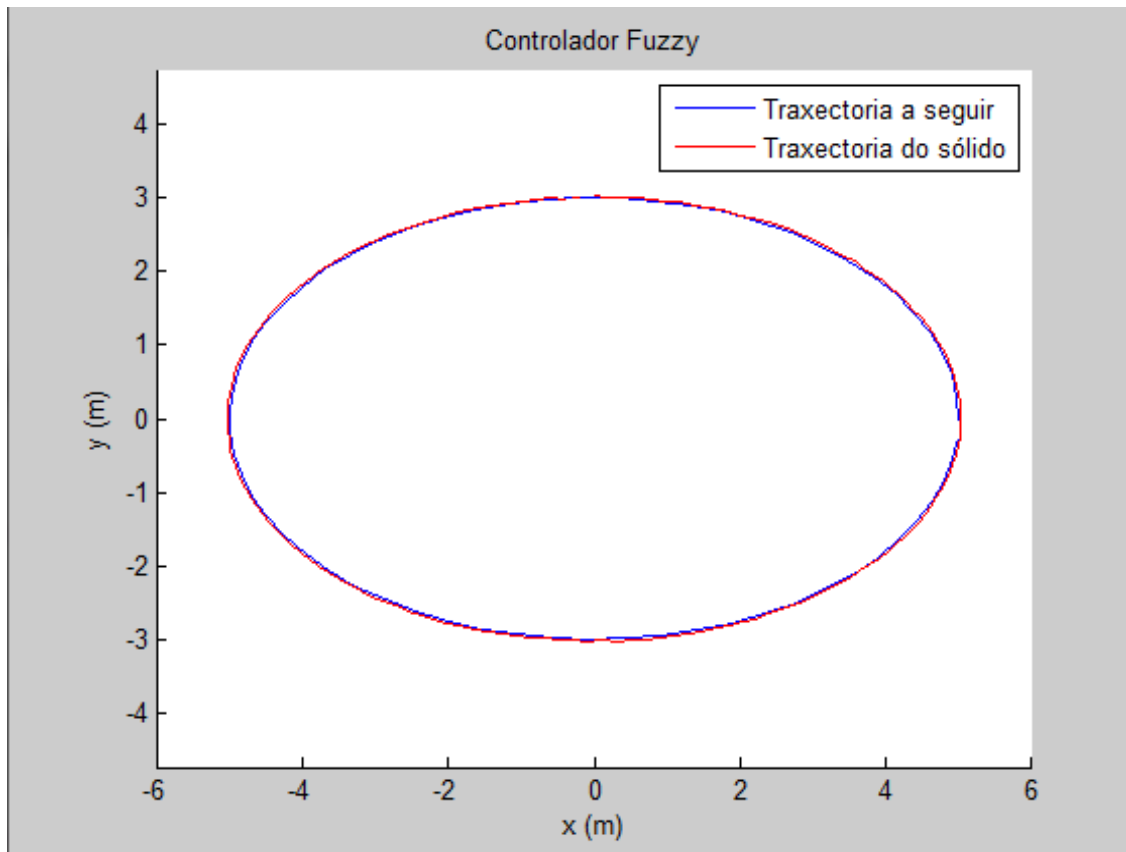
- MD: Moito á dereita
- D: Á dereita
- PD: Un pouco á dereita
- C: Centro
- PI: Un pouco á esquerda
- I: Á esquerda
- MI: Moito á esquerda

O eixo "x" corresponde á forza en Newtons e o eixo "y" ao grado de pertenza dos conxuntos borrosos. O rango máximo é de 1 N, pero isto podémolo variar mediante unha constante antes de actuar no sistema. As regras do conxunto borroso podémolas ver na Imaxe 30.

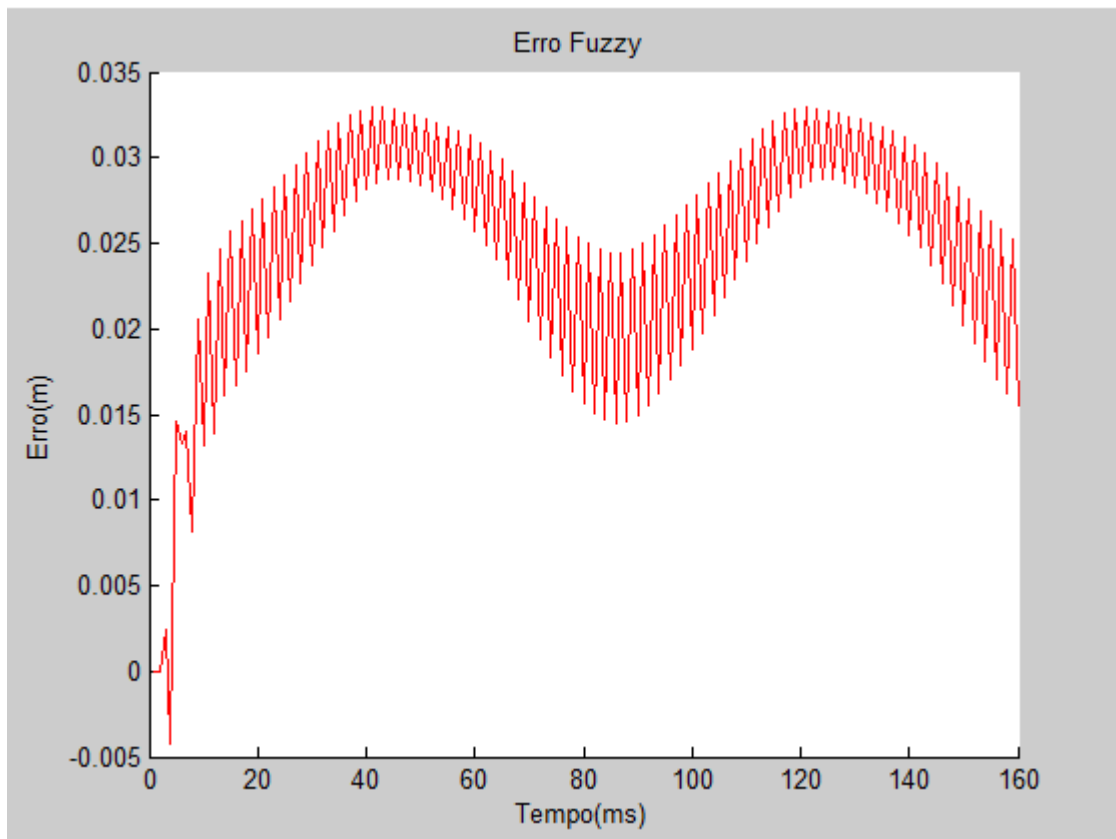


Imaxe 30 Regras do control borroso

O resultado do control é o seguinte:



Imaxe 31 Traxectoria do sólido ao longo da elipse fronte á traxectoria a seguir cun controlador Fuzzy



Imaxe 32 Erro do sólido ao longo da simulación

O axuste é moi preciso e o sólido segue ben a traxectoria requirida. Aínda se pode mellorar o sistema engadindo máis conxuntos borrosos, regras ou modificando a ganancia de saída.

O erro ao longo da volta da Imaxe 32 se reduce con respecto ao controlador PID, cuxo valor máximo neste caso é de 0,03 m.

4.5 O circuío

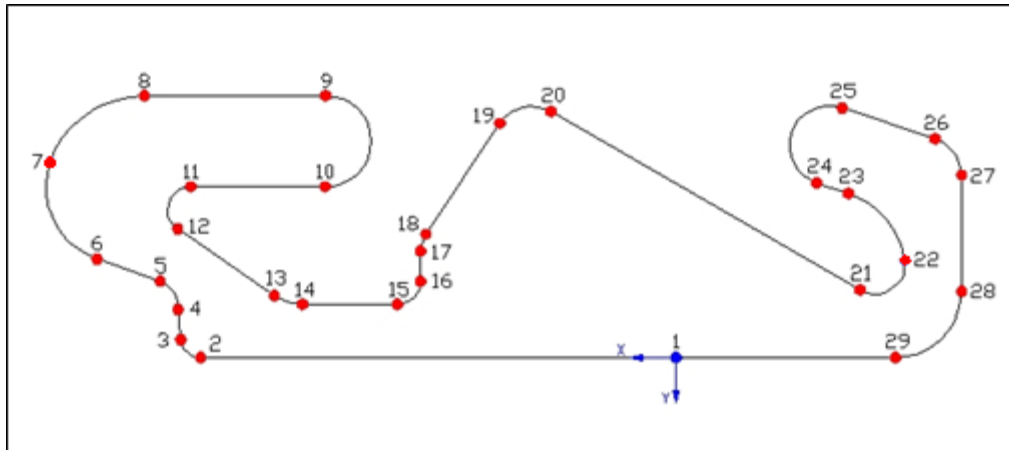
4.5.1 Descrición

Unha vez deseñados e axustados os parámetros dos dous controladores desenvolvidos no apartado anterior, vanse implementar directamente nun circuío.

Elixiuse como modelo un circuío de competición real, o Circuío de Cataluña, polas características do seu trazado e pola facilidade de atopar información sobre el. A característica máis importante do Circuío de Cataluña é o seu trazado irregular, con tramos rectos de distintas lonxitudes que alternan con diversos tipos de curvas, o que esixe ao condutor un bo dominio do vehículo. Cómpre destacar que se asumiu que o circuío é totalmente plano.

Os datos sobre a xeometría do circuíto obtivéronse da información fornecida en varias páxinas web. A páxina web oficial do Circuíto de Cataluña (<http://www.circuitcat.com>) proporciona abundante información.

A Imaxe 33 mostra os extremos dos tramos deseñados, sendo o punto 1 o que se corresponde coa posición de saída dos vehículos. A Táboa 7 mostra as coordenadas dos puntos anteriores referidos ao sistema de referencia indicado na figura, con orixe no punto de saída, o punto 1, e co eixo x coincidindo co sentido da marcha na dirección da recta principal do circuíto (*recta de tribunas*).



Imaxe 33 Debuxo esquemático do Circuíto de Cataluña

Punto	x (m)	y (m)	Punto	x (m)	y (m)
1	0	0	16	385,40	-115,50
2	717,89	0,00	17	385,40	-161,92
3	747,78	-27,39	18	377,84	-186,89
4	752,53	-81,74	19	265,69	-355,06
5	779,07	-115,97	20	188,33	-373,04
6	874,38	-149,64	21	-278,49	-102,11
7	944,87	-296,23	22	-345,53	-147,12
8	803,22	-396,90	23	-260,97	-248,62
9	529,30	-396,90	24	-212,90	-264,60
10	529,30	-258,90	25	-250,81	-378,56
11	732,99	-258,90	26	-391,84	-331,55
12	752,92	-195,13	27	-431,50	-276,53
13	606,66	-93,84	28	-431,50	-100,00
14	563,96	-80,50	29	-331,50	0,00
15	420,40	-80,50			

Táboa 7 Coordenadas dos puntos máis significativos do circuíto

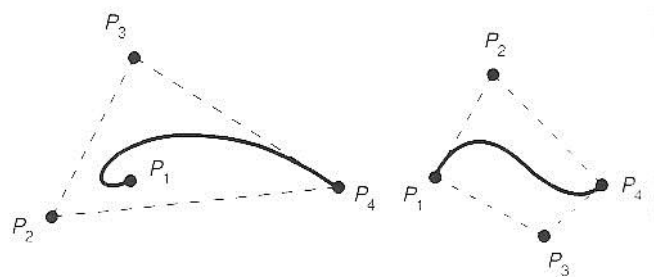
Para implementar o circuío da simulación imos explicar a súa construción mediante curvas de Bézier e tamén hai que ter en conta a definición de “erro” na simulación, así como o cálculo deste.

4.5.2 Traxectoria a seguir: Curvas de Bézier

A traxectoria que debe seguir o vehículo represéntase mediante unha secuencia de segmentos de curva conectados. Deste xeito, é posible representar calquera traxectoria coa precisión que sexa necesaria, unicamente engadindo máis segmentos de curva. Estas curvas son curvas de Bézier.

Mediante curvas paramétricas pódese representar calquera tipo de traxectoria, no plano ou no espazo. No simulador, dada a natureza do control do vehículo, optouse por usar traxectorias bidimensionais. Isto non significa que o vehículo non poida seguir traxectorias no espazo (subidas, baixadas, etc) senón que a traxectoria está almacenada mediante a súa proxección no plano. O uso de curvas de Bézier 3D unicamente implicaría usar puntos 3D en lugar de 2D, sen ningún cambio adicional no algoritmo; no entanto, só se empregou a segunda opción.

As curvas de Bézier son curvas paramétricas caracterizadas por catro puntos P1, P2, P3 e P4, chamados *puntos de control*. Devanditos puntos determinan unha zona chamada o “casarón convexo” (*convex hull*). Está garantido que unha curva de Bézier non ten nunca puntos contidos fóra deste casarón. Isto é de utilidade á hora de facer comprobacións rápidas, é dicir, sinxelas e de baixo custo computacional, da proximidade dun punto calquera á curva Bézier.



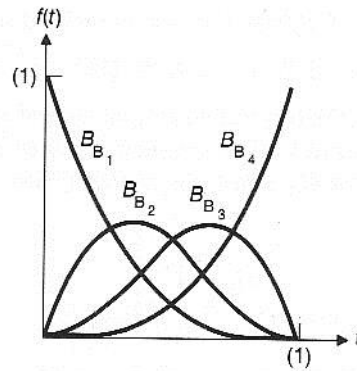
Imaxe 34 Curvas de Bézier e puntos de control

Os puntos P1 y P4 determinan os extremos da curva, polo que esta pasa necesariamente por eles. Mediante os puntos P2 e P3 determínanse as tanxentes á curva nos seus extremos. Para iso, o vector formado por un punto extremo e o seu contiguo, p. ex. P1 y P2, ten a dirección da tanxente á curva nese punto extremo.

A expresión paramétrica da curva é función dos puntos de control antes mencionados e ten o seguinte aspecto:

$$\mathbf{Q}(t) = (1-t)^3 \mathbf{P}_1 + 3t(1-t)^2 \mathbf{P}_2 + 3t^2(1-t) \mathbf{P}_3 + t^3 \mathbf{P}_4 \quad (11)$$

Na expresión anterior, os coeficientes de cada un dos puntos corresponden aos chamados *polinomios de Bernstein*. Estes polinomios teñen como particularidade que a súa suma, para calquera valor do parámetro t , é igual á unidade, o que os fai ideais para a ponderación de cada un dos puntos de control conforme se recorre a curva. Os valores $t=0$ y $t=1$ representan os puntos extremos da curva, é dicir, P1 e P4 respectivamente, aínda que as ecuacións seguen sendo válidas para calquera t externo a ese rango.



Imaxe 35 Polinomios de Bernstein

As curvas presentan continuidade C_0 , cando o punto P4 dun segmento coincide co P1 do segmento seguinte. Ademais, gracias á posibilidade de impoñer directamente o valor das tanxentes nos extremos de cada segmento, é posible alcanzar o grao de continuidade C_1 entre segmentos cando a tanxente definida polos puntos P4-P3 da primeira curva é idéntica á definida polos puntos P2-P1 da seguinte.

A forma da expresión paramétrica da curva (12) é polinómica, o que garante a súa continuidade e derivabilidade para calquera valor do parámetro t . Isto facilita en gran medida a obtención de certas características da curva, necesarias para o algoritmo do controlador. Como exemplo de ditas características está a obtención da tanxente para calquera punto da curva. Mediante a derivación con respecto ao parámetro t da expresión polinómica antes mostrada, obtense tamén a curvatura grazas á expresión xeral:

$$\kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \ddot{x}\dot{y}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \quad (12)$$

A parametrización permite desacoplar a descrición da traxectoria e o código, dado que aquela cárgase en tempo de execución desde un ficheiro de datos. A traxectoria pode ser, polo tanto, creada desde un programa externo.

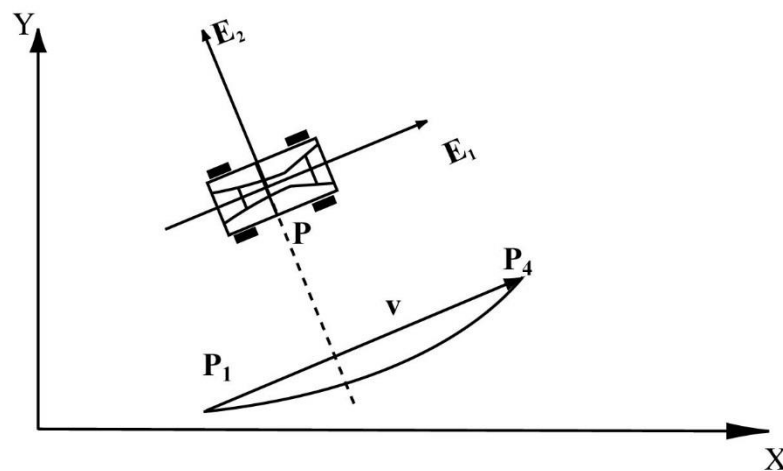
A propia natureza da traxectoria formada polas curvas de Bézier, ao estar formada por múltiples segmentos de curva, facilita a tarefa de determinar en que punto se atopa o vehículo. É dicir, impónse unha segmentación implícita da traxectoria que pode ser moi útil en casos particulares, como en zonas de cruzamento da mesma, onde a información será suficiente para poder determinar que ruta se ha de tomar. Isto é posible dada a

secuencialidade dos segmentos, que impón o sentido de percorrido da ruta ademais da súa localización.

A densidade en canto a número de segmentos de curva por unidade de área non é fixa, co que é posible engadir máis segmentos ás zonas máis complexas e menos ás máis sinxelas (rectas prolongadas).

A natureza paramétrica das curvas permite evitar os casos de singularidades que se atoparían con representacións cartesianas ($\text{tg}90^\circ$, etc.). Ademais, permite que un único segmento poida cortarse consigo mesmo (*lazo*).

4.5.3 Definición e cálculo do “erro”



Imaxe 36 Intersección da normal ao vehículo coa curva obxectivo

Unha vez descrita a traxectoria que debe seguir o vehículo, o procedemento para detectar a intersección entre a normal a este e a curva, Imaxe 36, é sinxelo. Este procedemento necesítase para determinar os erros de posición do vehículo. O primeiro paso consiste en detectar con que curva se produce a intersección. Para iso, calcúlase a intersección entre unha recta que pasa polo centro do coche (punto P) e está orientada segundo o vector normal, n , e outra que pasa polo punto P1 e está orientada segundo o vector v , correspondente á corda da curva entre P1 e P4. Se se expresan estas rectas en paramétricas, trátase de resolver o sistema:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \mathbf{P} + \lambda \mathbf{n} \\ \mathbf{r}_2 &= \mathbf{P}_1 + \mu \mathbf{v} \end{aligned} \quad (13)$$

Como só interesa saber se ambas rectas se cortan, basta con despegar o parámetro μ e verificar que o seu valor está entre 0 e 1. Se non, pásase a comprobar a intersección con outra curva.

Unha vez que se determinou con cal das curvas se produce a intersección, calcúlase o punto de corte coa mesma. Para iso, a expresión da curva (11) exprésase como un polinomio en función do parámetro t , que adopta a seguinte expresión:

$$\mathbf{Q}(t) = (-\mathbf{P}_1 + 3\mathbf{P}_2 - 3\mathbf{P}_3 + \mathbf{P}_4)t^3 + 3(\mathbf{P}_1 - 2\mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3)t^2 + 3(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)t + \mathbf{P}_1 \quad (14)$$

O polinomio pódese escribir como:

$$\mathbf{Q}(t) = \alpha t^3 + \beta t^2 + \gamma t + \delta \quad (15)$$

Novamente, os valores do parámetro t correspondentes á parte da curva situada entre os puntos de control, son aqueles comprendidos entre 0 e 1. De feito, verifícase que $\mathbf{Q}(0) = \mathbf{P}_1$ e $\mathbf{Q}(1) = \mathbf{P}_4$.

A continuación, plantéxase a intersección da curva definida polo polinomio (14) coa recta r_1 . Isto implica igualar as distintas compoñentes. Ao igualar a compoñente x , resulta a seguinte ecuación:

$$\alpha_x t^3 + \beta_x t^2 + \gamma_x t + \delta_x = P_x + \lambda n_x \quad (16)$$

Dela pódese despear o parámetro λ en función de t como:

$$\lambda = \frac{1}{n_x} (\alpha_x t^3 + \beta_x t^2 + \gamma_x t + \delta_x - P_x) \quad (17)$$

Este valor introdúcese na ecuación correspondente ao igualar as compoñentes en y , co que resulta a seguinte ecuación cúbica en t :

$$\begin{aligned} (n_x \alpha_y - n_y \alpha_x) t^3 + (n_x \beta_y - n_y \beta_x) t^2 + (n_x \gamma_y - n_y \gamma_x) t \\ + n_x (\delta_y - P_y) - n_y (\delta_x - P_x) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

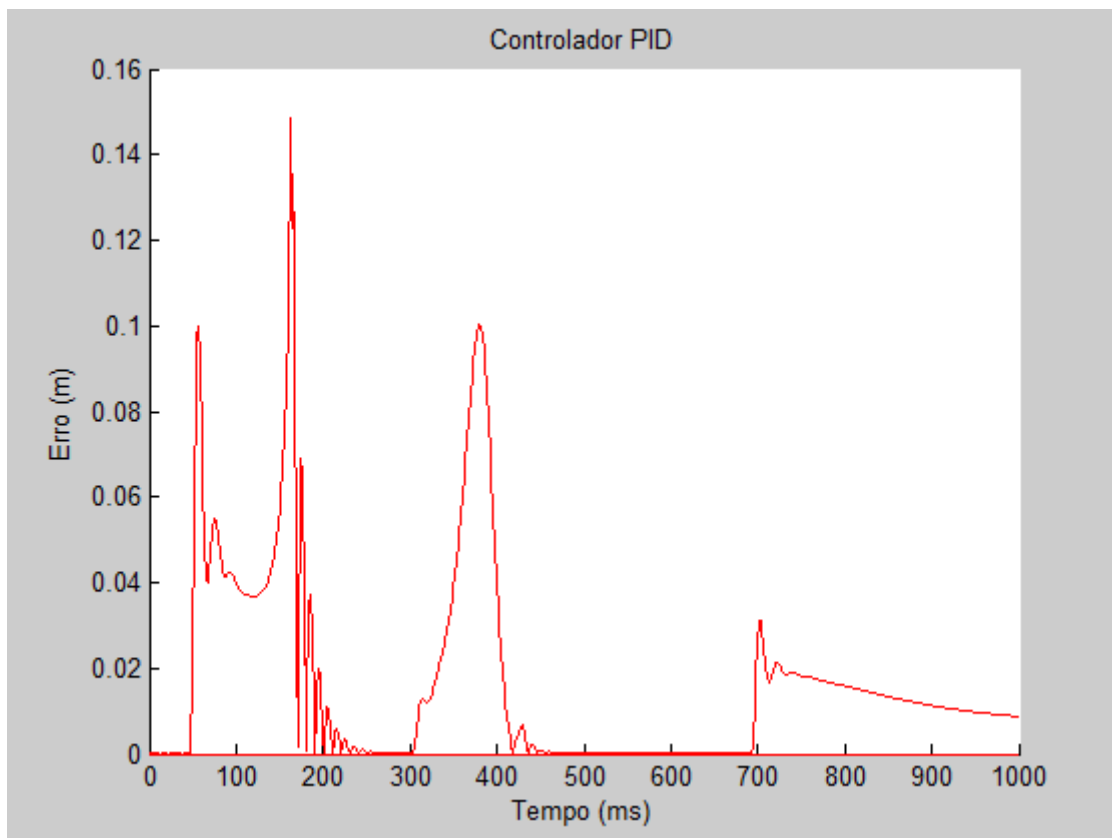
Para a obtención das raíces do polinomio resólvese a ecuación de terceiro grao. Finalmente, unha vez obtidas as tres raíces, quedarémonos con aquela raíz real que tome valores entre 0 e 1.

Unha vez obtido o valor da raíz real entre 0 e 1, calculamos a coordenada do punto de corte na curva. A continuación xa podemos calcular a distancia entre o sólido e o punto de corte coa curva, para obter así o “erro”, co que actuaremos en función da súa magnitude.

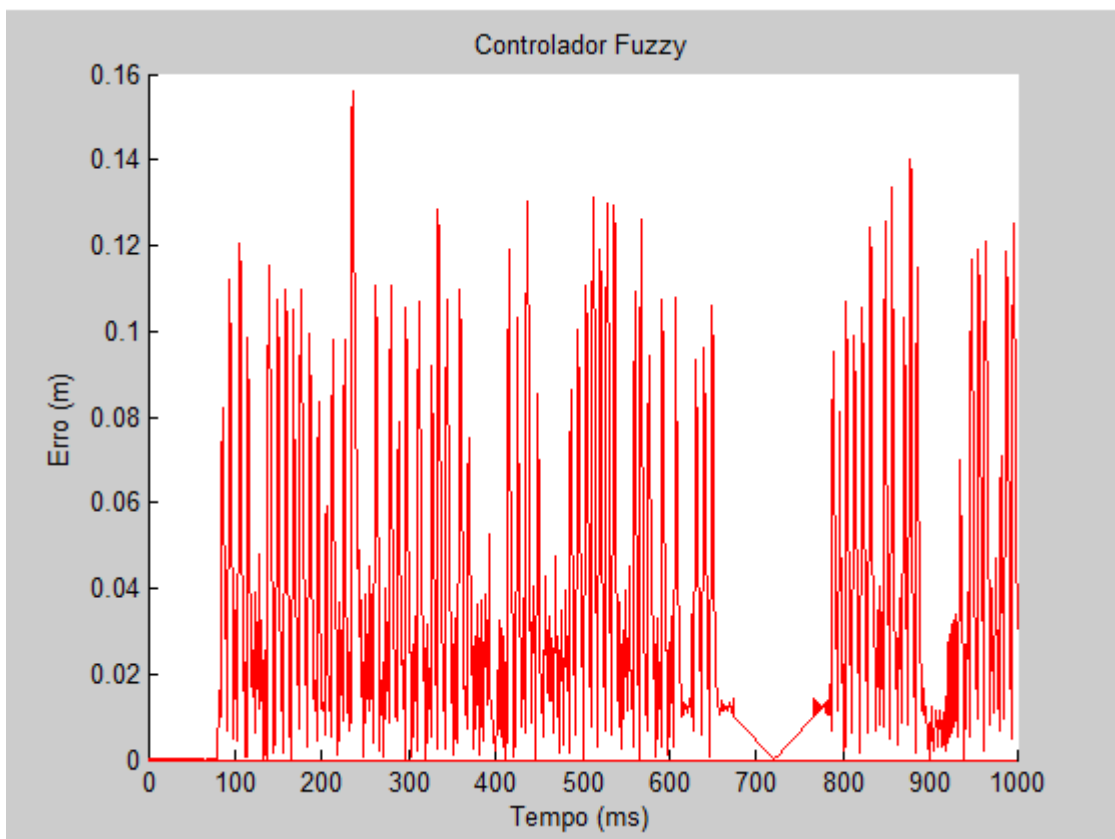
4.5.4 Controlador PID

Unha vez definido o erro para actuar en consecuencia e cos controladores desenvolvidos na elipse, imos implementar directamente estes controladores no circuíto, xa que as características da masa puntual son as mesmas, e o sólido ten que ter capacidade de percorrer o circuíto perfectamente.

A simulación realízase desde o punto 2 ata o punto 7 do circuíto, cremos que é suficiente para ver o funcionamento do control.



Imaxe 37 Erro do sólido ao longo da simulación co controlador PID



Imaxe 38 Erro do sólido ao longo da simulación co controlador borroso

As condicións iniciais nesta simulación son: velocidade inicial do sólido de 20 m/s, masa de 1000 kg, o paso de tempo é de 0.01 s na simulación, e todas estas condicións iniciais empregaranse nas simulacións de Matlab posteriores. A ecuación pola que se rexe a súa dinámica é a segunda Lei de Newton:

$$F = ma \quad (19)$$

A duración da simulación será de 10 s, e ganancia de todos os termos do controlador é igual ao PID da recta, 9 e5 para a ganancia proporcional, 7.2 e6 para a derivativa e 17 e3 para a ganancia integral.

O erro ao longo deste tramo móstrase na Imaxe 37.

O erro máximo ao longo do tramo co controlador PID é de 0.15 m. con respecto á liña de referencia, xa que logo, é un erro perfectamente asumible. Podemos dicir que o controlador PID empregado nesta simulación é moi bo.

4.5.5 Controlador Fuzzy

Agora imos implementar o controlador borroso empregado na elipse. A simulación realízase desde o punto 2 ata o punto 7 do circuíto, tamén de 10s de duración e mesmas condicións iniciais, así poderemos comparar os resultados. O erro ao longo deste tramo móstrase na Imaxe 38.

4.6 Simulador LIM

As simulacións cun sólido puntual realizadas nos anteriores subapartados son orientativas pero non definitivas, xa que a dinámica dun vehículo real é totalmente distinta a unha masa puntual, e por iso necesitamos un simulador máis realista para facer probas máis axustadas á realidade da dinámica dun vehículo.

4.6.1 Descrición

Comezamos coa simulación do prototipo empregado no laboratorio de *Ingeniería Mecánica* da *Escola Politécnica Superior da Coruña*. Este simulador empregouse en moitas ocasións para múltiples funcións, como o comportamento ao longo da simulación, esforzos nos seus compoñentes ou outros tipos de probas. O obxectivo é mellorar o controlador actual, o que quere dicir, diminución do erro en posición, unha condución máis natural e aumento da velocidade do prototipo virtual sempre que sexa posible.

4.6.2 O simulador

As subrutinas “INI” e “CALCULO” corresponden ao modelo virtual do prototipo que se detallou no capítulo anterior. Como se mencionou, estas subrutinas programáronse en Fortran. A función principal que aglutina todas as subrutinas do esquema está programada en C.

Como compiladores empregáronse *Compaq Visual Fortran 6.5* e *Microsoft Visual Studio 2013*. Estes compiladores comparten a contorna do *Microsoft Developer Studio*, e facilitan a programación en linguaxes mixtas. Este último factor, xunto co interface de programación sinxelo, ha de ter gran relevancia á hora da elección destes compiladores. No esquema de funcionamento do simulador distinguíronse as partes correspondentes a “INI” e “CALCULO” porque responden, ademais, a situacións distintas do simulador. No primeiro bloque realízase a lectura das posicións e velocidades iniciais independentes. A partir delas, realízase o cálculo dos problemas de posición e velocidade inicial, e o cálculo de aceleracións iniciais.

A subrutina “GUIADA” contén o controlador do prototipo que corresponde á actuación no xiro do volante, e á actuación no pedal de freo e acelerador. Esta será a función principal na que traballaremos.

En devandito controlador é importante dicir que a velocidade do xiro do volante é o xiro máximo, tal e como sería na realidade. O volante pode ter un xiro máximo en torno a 450° a esquerdas, e outro tanto a dereitas. A velocidade do xiro máxima do volante límitase de xeito similar ao que podería ser un condutor humano, neste caso 8° entre instantes de integración consecutivos.

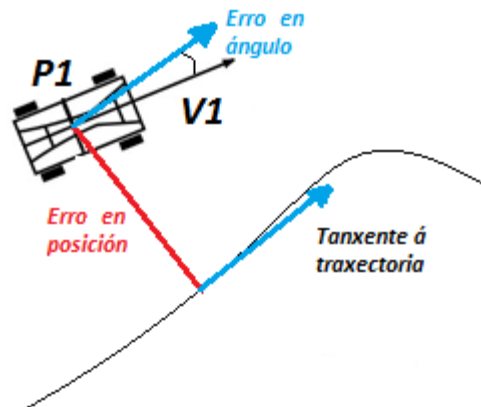
4.6.3 O erro de posición e o erro angular

Antes de comezar coa creación do controlador primeiro temos que definir que variables empregaremos como referencia para a súa actuación. As coordenadas do centro de masas dun vehículo, ao seguir unha traxectoria, irán cambiando ao longo do tempo, pero tamén o fará o resto de compoñentes. O concepto de erro de posición é o mesmo que o definido en simulacións anteriores, pero debemos engadir unha nova variable, que é o erro angular. O erro angular é necesario para corrixir a dirección de avance do vehículo con respecto á da estrada, xa que podemos ter un erro en posición 0, pero poida que a dirección de avance non sexa a correcta. Así, o control actuará en consecuencia destas dúas variables e teremos un comportamento máis natural.

O erro de posición obtense a partir da distancia que hai entre o centro de masas do vehículo (punto P1 do modelo virtual) ao momento de referencia da estrada en dirección normal a esta. Esta definición de erro é similar á empregada en simulacións anteriores.

O erro angular obtense a partir do ángulo de desfase entre a dirección de avance do vehículo (vector V1 do prototipo virtual) coa dirección que leva a estrada.

Na Imaxe 39 móstranse ilustrativamente os erros explicados anteriormente.



Imaxe 39 Representación do erro en posición e do erro en ángulo dun vehículo coa traxectoria

Do mesmo xeito que fixemos en simulacións anteriores, imos seguir o mesmo procedemento á hora de realizar as simulacións cos distintos tipos de controladores.

4.6.4 Simulacións

Comezaremos coas simulacións para o desenvolvemento dos controladores PID e Fuzzy, que mostraremos de aquí a final do capítulo. As simulacións duran unha volta completa e o trazado é unha reprodución do circuíto de Cataluña reducido á súa terza parte e totalmente plano.

Unha vez realizadas as simulacións o que faremos será obter os seus resultados. Estes son: o tempo por volta, o erro de posición e o erro angular. Buscaremos reducilos ao máximo posible para ir mellorando o control do vehículo.

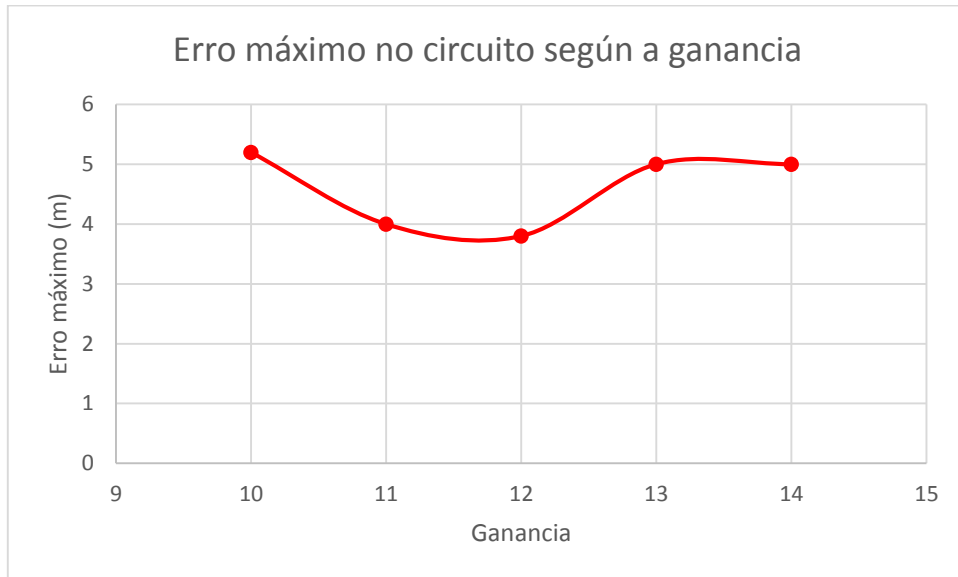
Cómpre destacar que o simulador contiña inicialmente un controlador Fuzzy para o xiro do volante, ao que lle chamaremos *Fuzzy orixinal*, e que utilizaremos como comparación para a optimización dos nosos controis PID e Fuzzy.

4.6.5 Controlador PID

Control proporcional ao erro en posición

Primeiramente engadimos un término proporcional ao erro en posición, da mesma maneira que en simulacións anteriores. O sistema é oscilante ao longo do circuíto, pero

segundo a ganancia pódese completar. O tempo por volta é de 160 s. Está claro que isto non é o que queremos, debemos melloralo cun término derivativo ao erro en posición. Para axustar a ganancia proporcional, axustouse empiricamente minimizando o valor máximo de erro ao longo da simulación, Imaxe 40. Así buscamos unha magnitude idónea para un control mellor.



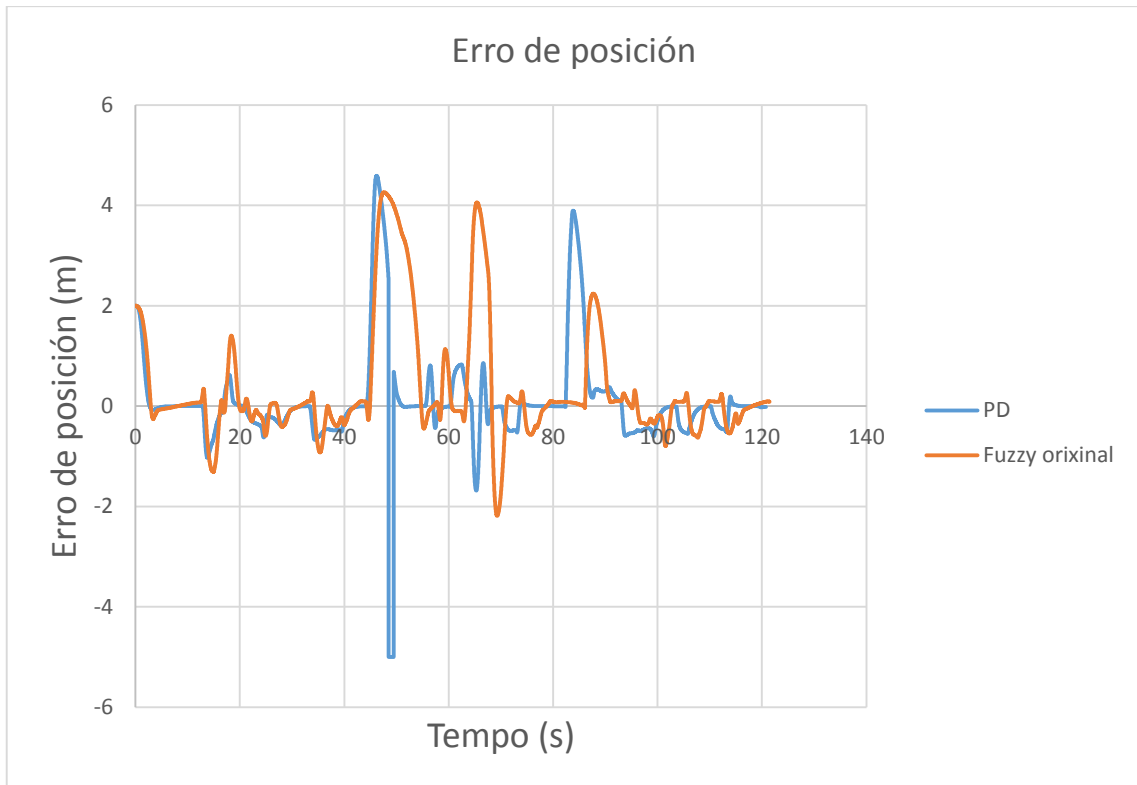
Imaxe 40 Erro máximo no circuito según a magnitude da ganancia

Control proporcional-derivativo ao erro en posición

Engádese un término derivativo e o sistema mellora considerablemente, sobre todo nas rectas. Pode completar o circuíto sen problemas.

A ganancia do término derivativo aumentouse ata que a actuación do volante fose suave. Variouse tamén a ganancia proporcional lixeiramente, e se se aumenta moito a ganancia derivativa, o sistema vólvese inestable. Xa que logo, deixamos os valores nun punto no que o sistema sexa estable e o xiro de volante sexa continuo e suave. O tempo por volta deste controlador é de 119.62 segundos.

Na Imaxe 41 móstranse os valores de erro en posición ao longo do tempo. Os valores de erro angular non se mostrarán, estes van variando ao longo do percorrido en función das curvas, aínda que si os empregaremos para mellorar os controladores. O obxectivo principal é que o vehículo siga do mellor xeito posible o trazado do circuíto, e para iso basearémonos nos erros en posición. Tamén se mostran os valores do controlador orixinal, e así compáranse para ir na dirección correcta.



Imaxe 41 Erro de posición do controlador PD fronte ao orixinal

Controlador	Fuzzy orixinal	PD
Tempo por volta (s)	121.44	119.62
Erro máximo (m)	4.26	4.59
Erro cuadrático medio (m)	1.23	1.03

Táboa 7 Resultados obtidos do controlador PD

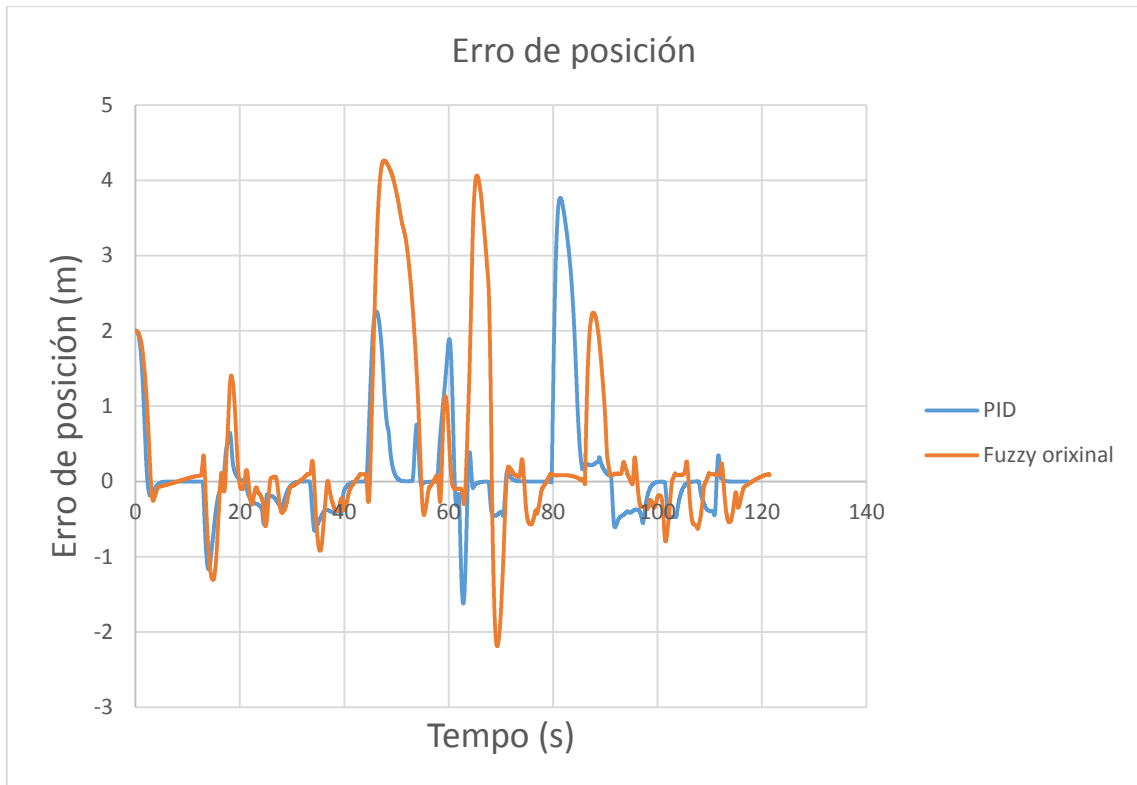
Na Táboa 7 móstranse os valores de tempo por volta, erro máximo rexistrado en toda a volta e erro cuadrático medio do erro en posición ao longo de toda esta volta. Tamén se mostran os mesmos valores para o controlador orixinal.

Controlador proporcional-derivativo-integral o erro en posición

Engádesse o término integral para evitar oscilacións durante o percorrido do circuito, sobre todo nas rectas. O sistema segue mellorando de bo xeito ao diminuír o valor de erro máximo, o erro cuadrático medio e o tempo por volta.

Deuse ganancia integral e diminúíuse algo a ganancia proporcional para evitar que o sistema se volviera inestable en certos puntos.

Na Imaxe 42 móstrase o erro en posición e na Táboa 8 os valores ao longo da simulación:



Imaxe 42 Erro de posición do controlador PID fronte ao orixinal

Controlador	Fuzzy orixinal	PID
Tempo por volta (s)	121.44	117.32
Erro máximo (m)	4.26	3.77
Erro cuadrático medio (m)	1.23	0.79

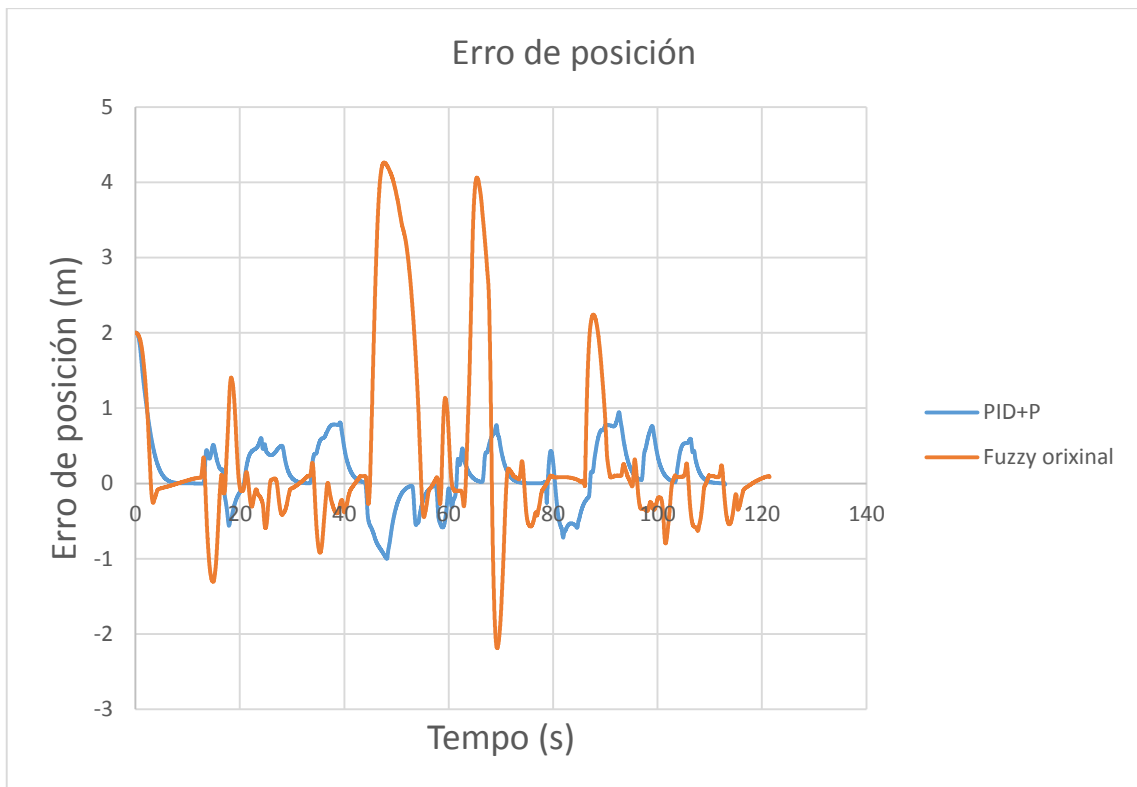
Táboa 8 Resultados obtidos do controlador PID

Control PID para o erro en posición - proporcional para o erro angular

Finalmente decídese actuar na orientación do vehículo engadindo un controlador superposto co controlador do erro en posición. Xa que logo, engadimos un término proporcional ao erro angular con respecto á estrada. Os erros de posición acumulados ao longo da simulación móstranse na Imaxe 43.

Vese claramente que durante a simulación o sistema mellora a súa resposta á entrada dunha curva con respecto ás simulacións anteriores. Agora podemos dicir que xa temos un control moi bo e que non se sae practicamente da liña de referencia. O sistema actúa máis rápido e mellora o tempo por volta. Diminúe o erro en ángulo e o erro en posición.

Hai que destacar que o valor máximo de erro en posición é o erro inicial no inicio da simulación, o erro cuadrático medio redúcese e o tempo por volta tamén, Táboa 9.



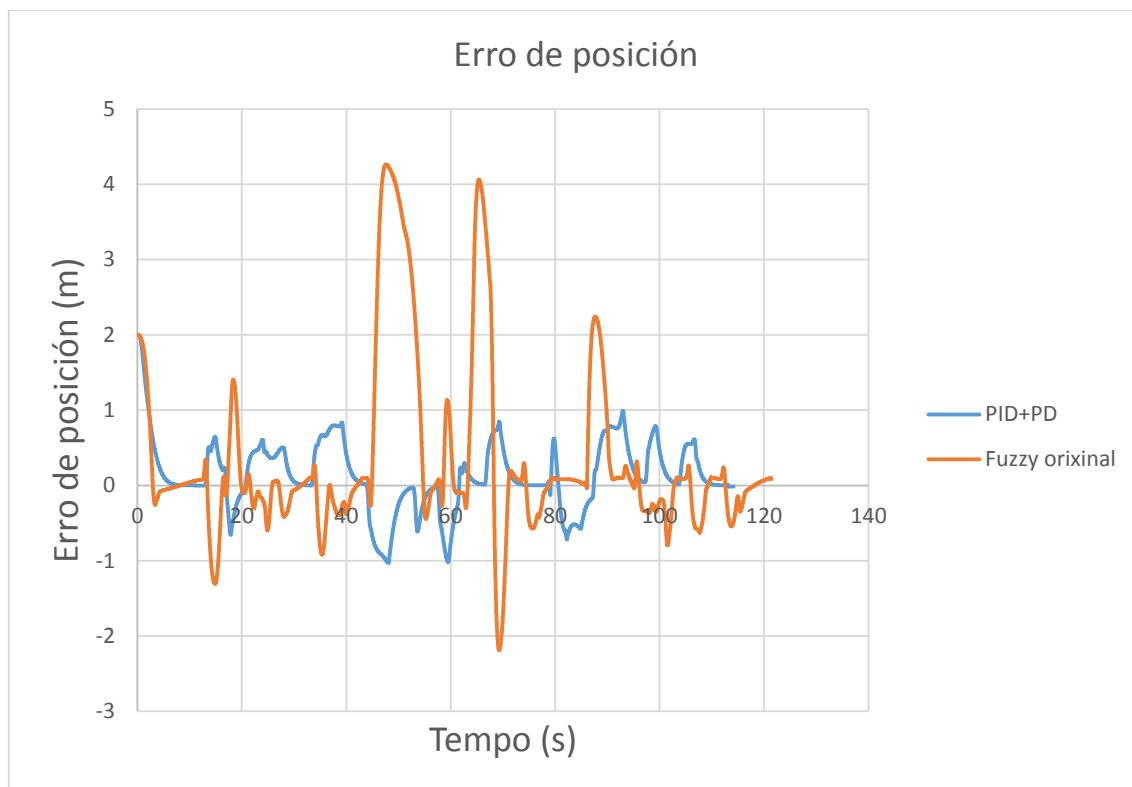
Imaxe 43 Erro de posición do controlador PID+P fronte ao orixinal

Controlador	Fuzzy orixinal	PID + P
Tempo por volta (s)	121.44	112.98
Erro máximo (m)	4.26	1
Erro cuadrático medio (m)	1.23	0.46

Táboa 9 Resultados obtidos do controlador PID + P

Controlador PID para o erro en posición – proporcional e derivativo para o erro angular

O seguinte será engadir un derivativo ao erro angular. O comportamento do vehículo é máis natural que o anterior pero vese unha alta frecuencia no xiro do volante, e se aumentamos a ganancia derivativa aumenta a amplitude das oscilacións. O controlador empeora con respecto ao anterior en todos os términos: o tempo por volta e o erro cuadrático medio.



Imaxe 44 Erro de posición do controlador PID+PD fronte o orixinal

Controlador	Fuzzy orixinal	PID + PD
Tempo por volta (s)	121.44	113.11
Erro máximo (m)	4.26	1
Erro cuadrático medio (m)	1.23	0.48

Táboa 10 Resultados obtidos do controlador PID + PD

Engadir o término integral non ten sentido, xa que non serve de nada acumular o erro angular ao longo do tempo nun sistema tan variable como as curvas nun circuito. O erro angular medido será, por así dicir, un erro local nun instante dado.

Controlador PID ao erro en posición, P ao erro angular y un término “feed forward”

O seguinte que se implementou foi un controlador PID ao erro de posición, un P ao erro angular e unha compoñente “Feed Forward”.

O control Feed Forward engade un término extra ao controlador en función da curvatura que presenta o circuito no punto no que estamos. Necesita coñecer de antemán o percorrido que hai que seguir. Así permite prever as distintas modificacións que vai sufrir o sistema e compénsalas antes de que a saída do sistema cambie.

Para iso, primeiro debemos saber a relación que hai entre o xiro do volante e a curvatura á que o vehículo sería capaz de seguir con ese ángulo de volante. En consecuencia, no

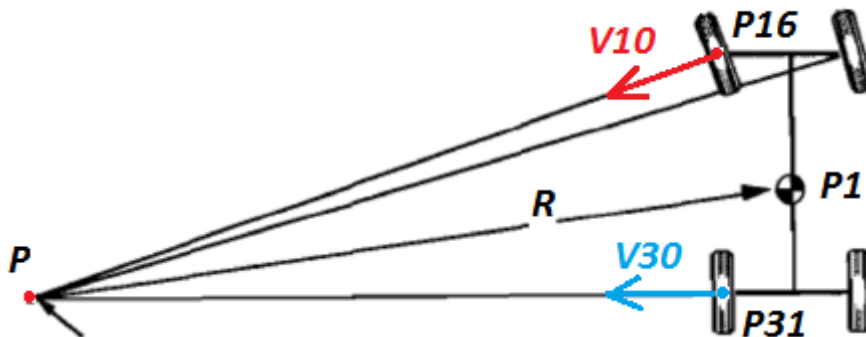
noso caso a idea é saber con que xiro do volante corresponde á curvatura que exista en cada momento da simulación. Coñecida esta relación podemos actuar no controlador. A ecuación do Feed Forward é a seguinte:

$$FFW = m_{recta} c \quad (20)$$

Onde:

- FFW é o resultado da actuación para o controlador Feed Forward, neste caso o xiro do volante.
- m_{recta} é a constante que relaciona o xiro do volante coa la curvatura que asigna ao vehículo.
- c é a curvatura que temos no instante da simulación.

A constante m_{recta} obtémola experimentalmente empregando a simulación. Co vehículo totalmente en reposo faremos xirar o volante, obtendo a posición e orientación da roda dianteira esquerda e da traseira esquerda; e a coordenada do centro de gravidade do vehículo. Con estes datos podemos obter o radio que pode dar o vehículo en función de dito xiro do volante, e como consecuencia, o valor da constante m_{recta} . Na Imaxe 45 móstrase unha imaxe teórica da planta dun vehículo, que amosa os puntos do centro das rodas, o centro de gravidade do vehículo, os vectores normais ao plano vertical das rodas e o punto de corte da prolongación destes vectores.



Imaxe 45 Esquema da planta do vehículo para o cálculo da relación entre xiro do volante e radio de xiro

Esta imaxe é necesaria para facilitar o cálculo, primeiro das coordenadas do punto de corte P , e posteriormente para calcular a distancia entre este punto e o centro de masas. Así obtemos o radio que pode proporcionar o vehículo en función do xiro do volante.

Onde:

- $P1$ é o centro de masas do vehículo
- $P16$ é a coordenada do centro da roda dianteira
- $P31$ é a coordenada do centro da roda traseira
- R é o radio da curva

- P é a orixe do radio da curva
- $V10$ es el vector normal al plano vertical de la rueda delantera en el punto $P16$
- $V30$ é o vector normal ao plano vertical da roda traseira no punto $P31$

A variable descoñecida é a coordenada da orixe do radio da curva. Igualando as ecuacións destas dúas rectas formadas polos vectores $V10$, $V30$ e os puntos $P16$ y $P31$ obtemos Px e Py en función do xiro do volante:

$$Px = \frac{P16y - P31y - \left(\frac{V10y}{V10x}\right) P16x + \left(\frac{V30y}{V30x}\right) P31x}{\left(\frac{V30y}{V30x} - \frac{V10y}{V10x}\right)} \quad (21)$$

A partir da coordenada "x", substituíndo en calquera das dúas rectas anteriores, obtemos o valor da coordenada "y":

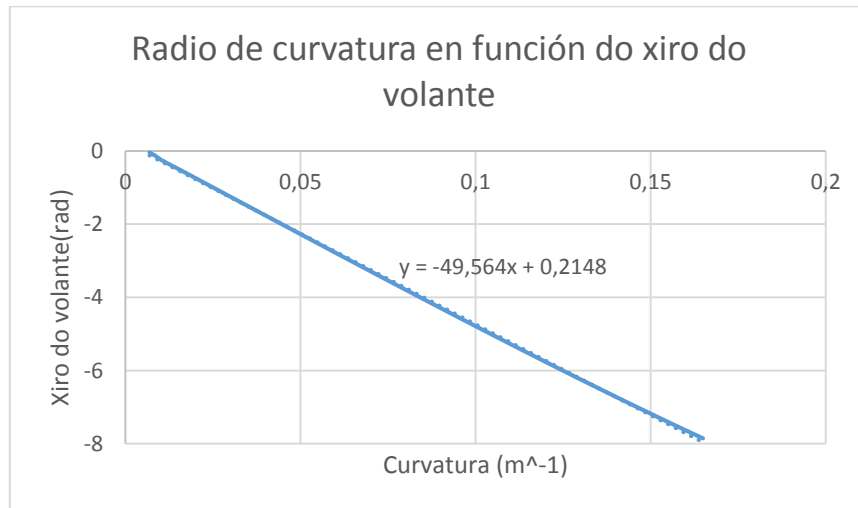
$$Py = P31y + \left(\frac{V30y}{V30x}\right) (Px - P31x) \quad (22)$$

Coas coordenadas do punto P coñecidas, xa podemos calcular o radio da curva, que é a distancia entre o punto P e o punto $P1$ (centro de gravidade do vehículo):

$$R = \sqrt{(Px - P1x)^2 + (Py - P1y)^2} \quad (23)$$

A continuación o valor de curvatura para cada xiro do volante será:

$$c = \frac{1}{R} \quad (24)$$



Imaxe 46 Cálculo da curvatura que se consegue en función do ángulo do volante

Finalmente o valor da curvatura en función do xiro do volante é o da Imaxe 46.

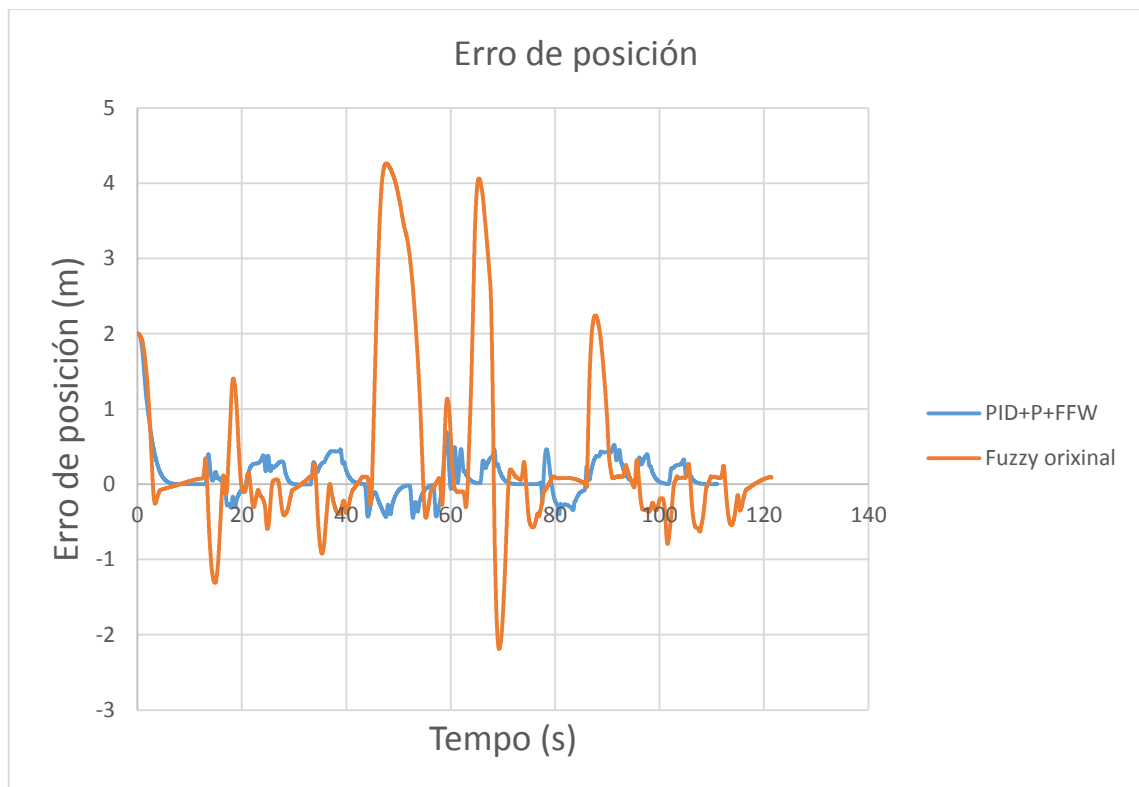
Cómpre destacar que o xiro do volante é completamente lineal ao radio de curvatura que asimila o vehículo.

A proba realizada na simulación foi un xiro a esquerdas ata un máximo de 7.85 rad de

xiro con respecto á posición 0 do volante, o signo negativo indica un xiro a esquerdas. A constante buscada é a pendente da recta, neste caso (49.564).

Unha vez coñecemos a relación, xa só nos queda implementalo na simulación e ver os resultados.

Esta compoñente, engadida ao controlador PID + P, mellora lixeiramente, tendo así unha maior anticipación á entrada das curvas; aínda que as diferenzas son mínimas, o tempo por volta conséguese baixar dos 112 segundos por primeira vez. Tamén se reduce o erro de posición.



Imaxe 47 Erro de posición do controlador PID + P + FFW fronte ao orixinal

Controlador	Fuzzy orixinal	PID + P + FFW
Tempo por volta (s)	121.44	111.09
Erro máximo (m)	4.26	0.70
Erro cuadrático medio (m)	1.23	0.32

Táboa 11 Resultados obtidos do controlador PID + P + FFW

4.6.6 Controlador FUZZY

Anteriormente o prototipo virtual foi xestionado por un control PID, a continuación imos desenvolver outro tipo de control, o controlador borroso.

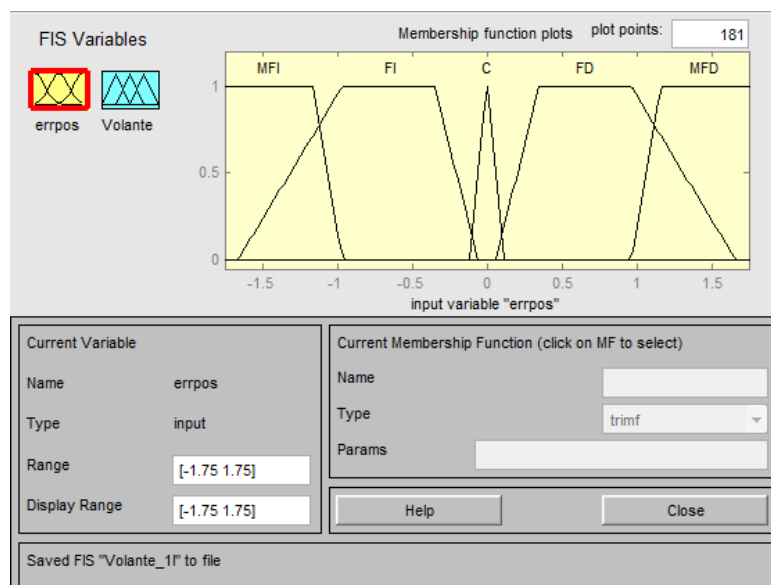
En primeiro lugar, temos que desenvolver o noso controlador, coa axuda da Fuzzy Logic Toolbox de Matlab. A Fuzzy Logic Toolbox proporciona un interface bastante intuitivo para o deseño de controladores. Accédese a el tecleando o comando *fuzzy* no espazo de traballo de Matlab. Os controladores deseñados son almacenados en ficheiros con extensión *.fis*. Para traballar con eles é necesario cargalos no espazo de traballo. Isto realízase mediante o comando *readfis* cuxo argumento é o ficheiro que queremos cargar. Para avaliar un vector de entradas do controlador emprégase a función *evalfis*. Os argumentos desta función son o vector de entradas e o controlador que se vai empregar, e devolve un vector coas saídas correspondentes nun arquivo de texto de extensión *.dat*.

Unha vez obtido este arquivo, lémosto no simulador en función da entrada que temos, para dar a súa saída correspondente.

CONTROLADOR FUZZY 1

Entrada: erro en posición - Saída: xiro do volante

Comezamos cunha soa entrada ao controlador, neste caso o erro en posición do prototipo virtual. O conxunto borroso para o erro en posición móstrase na Imaxe 48. O valor de entrada, neste caso o erro en posición, figura no eixe x e posteriormente asígnase a que conxuntos borrosos pertence a magnitude para saber o grao de pertenza de cada un no eixe *e*. Os conxuntos son 5 e teñen forma trapezoidal, así, a parte plana superior do conxunto terá sempre grao de pertenza 1, o que conleva un maior grao de pertenza no conxunto borroso da saída.



Imaxe 48 Conxunto borroso da entrada do controlador

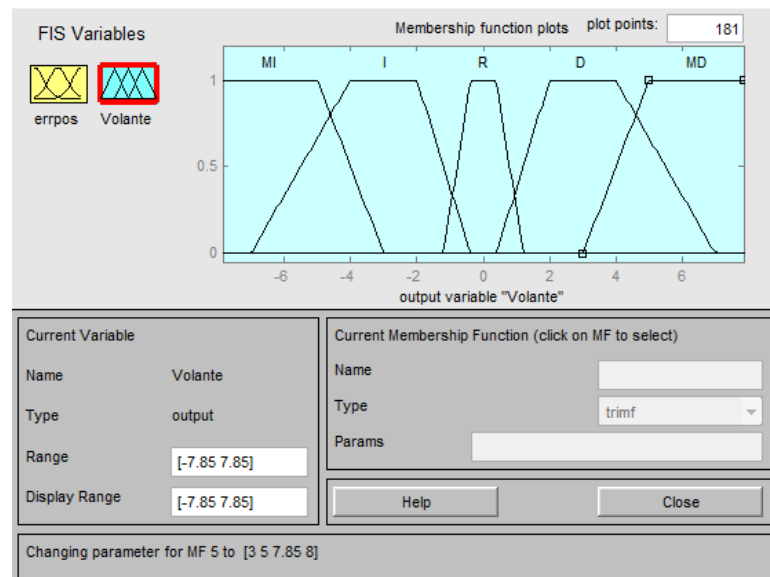
Onde:

- MFI: Moi fóra á esquerda
- FI: Fóra á esquerda
- C: Centrado
- FD: Fóra á dereita
- MFD: Moi fóra á dereita

O rango de valores de entrada vaise axustando segundo os resultados obtidos unha vez se van realizando as simulacións. O rango neste caso é de 1.75 m. Os erros maiores a 1.75 m penalízanse moito, xa que están fóra de rango, o que indica que a masa puntual está demasiado fóra do trazado.

A elección deste rango de entrada inflúe moito á hora da actuación do controlador, xa que canto máis pequeno sexa este rango, máis sensibilidade terá o controlador e máis oscilacións de alta frecuencia terá na actuación. Axustamos estes valores no punto óptimo.

O conxunto borroso, neste caso, a saída (o xiro de volante) é o da Imaxe 49. Os conxuntos son 5 e teñen forma trapezoidal, así, con esta forma auméntase a altura do centro de gravidade do conxunto borroso.



Imaxe 49 Conxunto borroso da saída do controlador

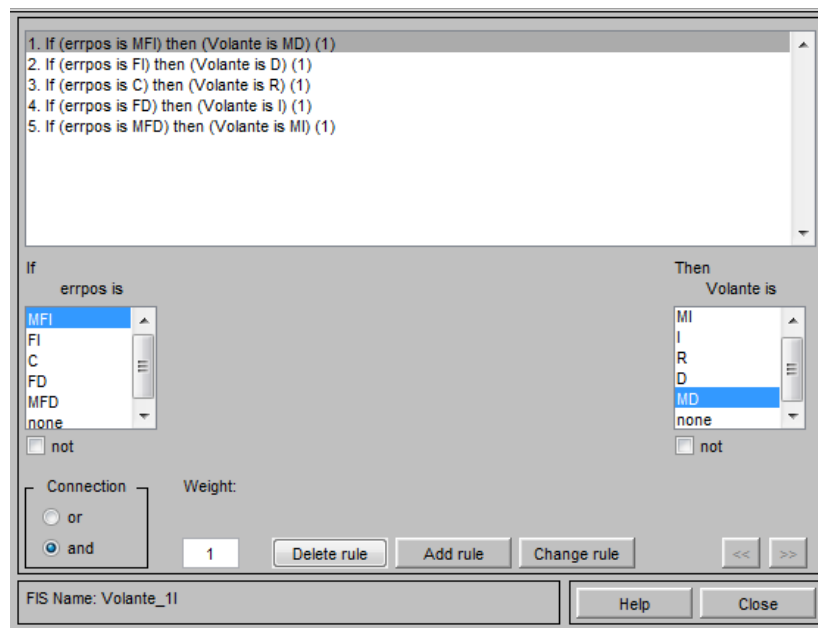
Onde:

- MI: Virar moito á esquerda
- I: Virar á esquerda
- R: Recto

- D: Virar á dereita
- MD: Virar moito á dereita

O eixe “x” corresponde ao ángulo do volante, medido en radiáns, co que temos que actuar no sistema. O valor máximo de xiro de volante admisible é de 7.85 rad a cada lado e o eixe; “y” é o grao de pertenza dos conxuntos borrosos.

Crear as regras é sinxelo, xa que o Fuzzy Logic Toolbox de Matlab tamén nos facilita esta tarefa. As regras pódense ver na Imaxe 50.

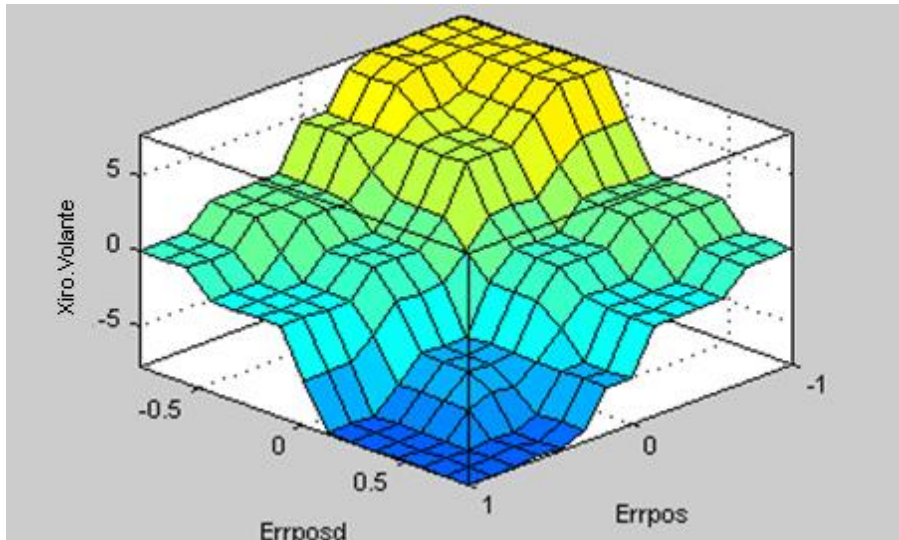


Imaxe 50 Xestión de regras do controlador

Unha vez implementado o controlador no simulador, o sistema vólvese oscilante, xa que soamente estamos controlando a posición. Debemos mellorar moito o sistema, posto que os erros de posición non son admisibles.

Entrada: erro en posición, derivada do erro en posición - Saída: xiro do volante

Engadimos outra entrada ao controlador, e esta é a derivada do erro de posición. Os conxuntos borrosos son similares ao anterior controlador, por iso, a partir de agora imos mostrar soamente o mapa de saída do controlador en función das súas entradas, onde no eixe “x” estarán os valores de entrada do erro en posición, en “e” os valores de entrada da derivada do erro, e finalmente en “z” estarán os valores de saída do xiro do ángulo.



Imaxe 51 Superficie de control xerada polas regras de actuación sobre o volante

Este mapa de saída ilústrase na Imaxe 51.

Onde:

- “Errpos” é o erro en posición
- “Errposd” é a derivada do erro
- “Xiro Volante” é a saída cara ao volante

O controlador non consegue completar o circuíto porque non é capaz de dar a curva 5. Imos substituír o término da derivada do erro polo erro angular e ver como se comporta.

Entrada: erro en posición, erro angular - Saída: xiro do volante

Engadimos dúas entradas ao controlador, a primeira, o erro en posición, e a segunda o erro angular. Os conxuntos borrosos son similares ao anterior controlador, por tanto, a partir de agora imos mostrar soamente o mapa de saída do controlador en función das súas entradas, onde no eixe “x” estarán os valores de entrada do erro en posición, en “y” os valores de entrada do erro en ángulo, e finalmente en “z” estarán os valores de saída do xiro do ángulo.

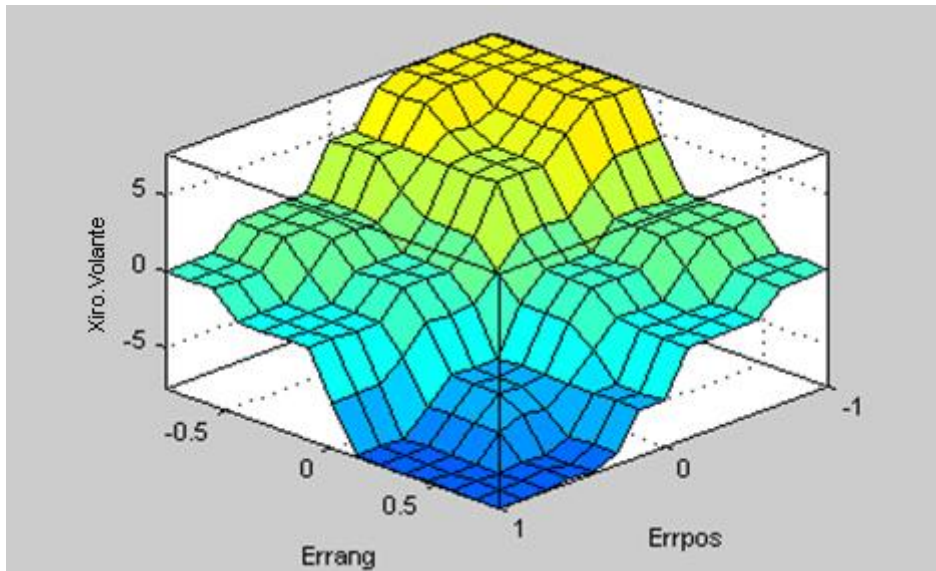
Este mapa de saída ilústrase na Imaxe 52.

Onde:

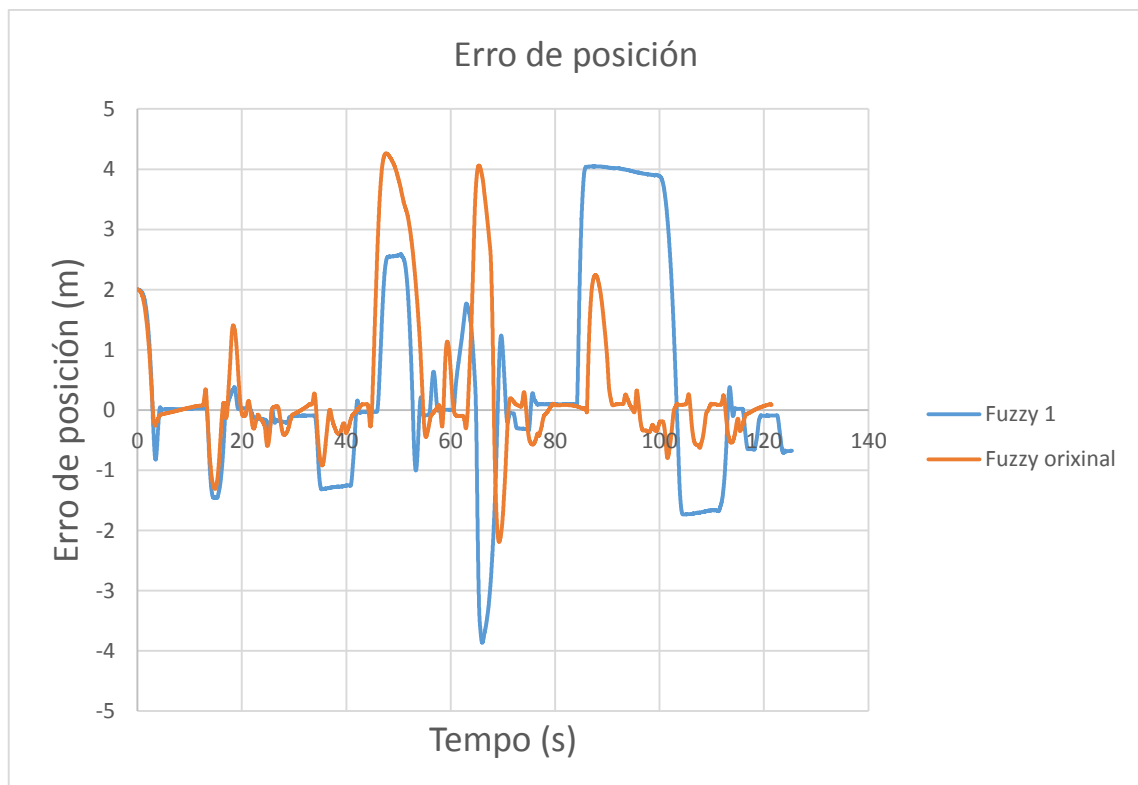
- “Errpos” é o erro en posición

- “Errang” é o erro angular
- “Xiro Volante” é a saída cara ao volante

O controlador consegue manter o prototipo na estrada, completando así o circuito. Pódese ver un comportamento similar ao controlador Fuzzy inicial neste programa. Nalgúns puntos mellora e en cambio noutros empeora. Polo tanto debemos melloralo.



Imaxe 52 Superficie de control xerada polas regras de actuación sobre o volante



Imaxe 53 Erro de posición do controlador Fuzzy 1 fronte ao orixinal

Controlador	Fuzzy orixinal	Fuzzy 1
Tempo por volta (s)	121.44	132.09
Erro máximo (m)	4.26	4.05
Erro cuadrático medio (m)	1.23	1.8

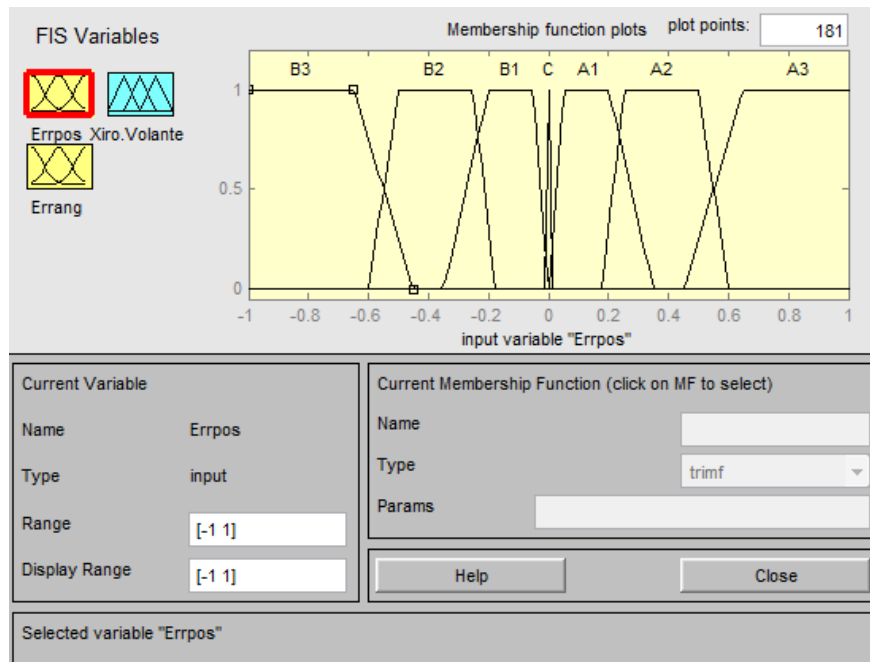
Táboa 12 Resultados obtidos do controlador Fuzzy 1

Tamén hai que destacar que o comportamento é similar ao controlador anterior, xa que a única diferenza é o valor de entrada; o que quere dicir que as dúas entradas se relacionan entre elas (derivada do erro e erro angular) xa que a derivada do erro indica a dirección que leva o prototipo nese momento e aseméllase ao erro angular do vehículo.

CONTROLADOR FUZZY 2

Entrada: erro en posición, erro angular - **Saída:** Xiro do volante

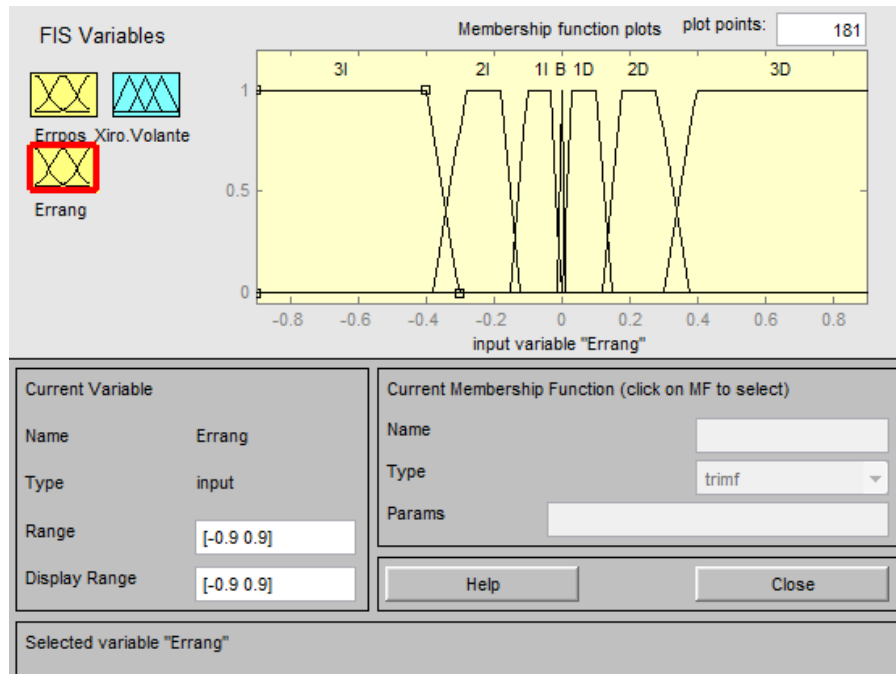
A raíz de que o controlador anterior non acaba de funcionar ben, decidimos crear un novo coas mesmas entradas e saídas que o Fuzzy 1 e ver o seu comportamento. Así, os conxuntos de entrada serán:, o da Imaxe 54 para o erro en posición, o da Imaxe 55 para o erro en ángulo y e o da Imaxe 56 para a saída do controlador. Engadimos máis conxuntos borrosos e en consecuencia un maior número de regras.



Imaxe 54 Conxuntos borrosos para o erro en posición

Onde:

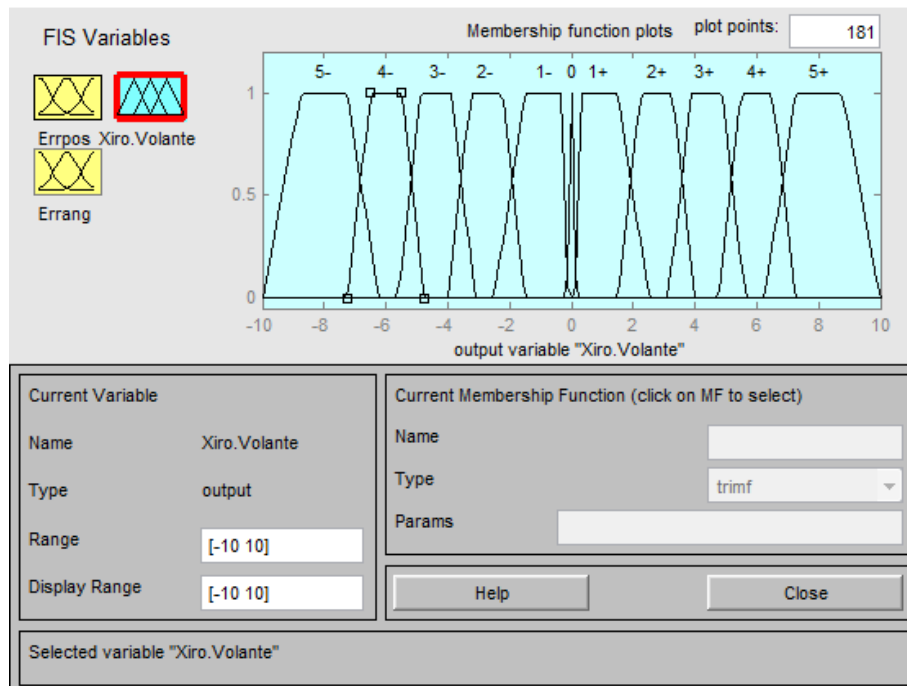
- O término “A” significa que o vehículo se atopa á dereita do punto de referencia, e a numeración indica de forma ascendente o grado no que o erro aumenta.
- O término “B” significa que o vehículo se atopa á esquerda do punto de referencia, e as numeracións seguen o mesmo patrón anterior.
- O término “C” indica que o prototipo non ten erro en posición.



Imaxe 55 Conxuntos borrosos para o erro en ángulo

Onde:

- O término “A” significa que o vehículo se atopa á dereita do punto de referencia, e a numeración indica de forma ascendente o grado no que o erro aumenta.
- O término “B” significa que o vehículo se atopa á esquerda do punto de referencia, e as numeracións seguen o mesmo patrón anterior.
- O término “C” indica que o prototipo non ten erro en posición.

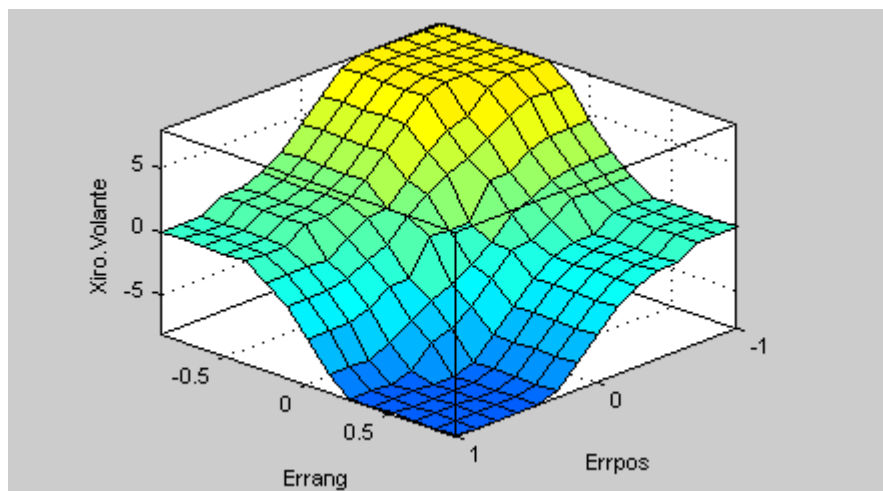


Imaxe 56 Conxuntos borrosos para o xiro do volante

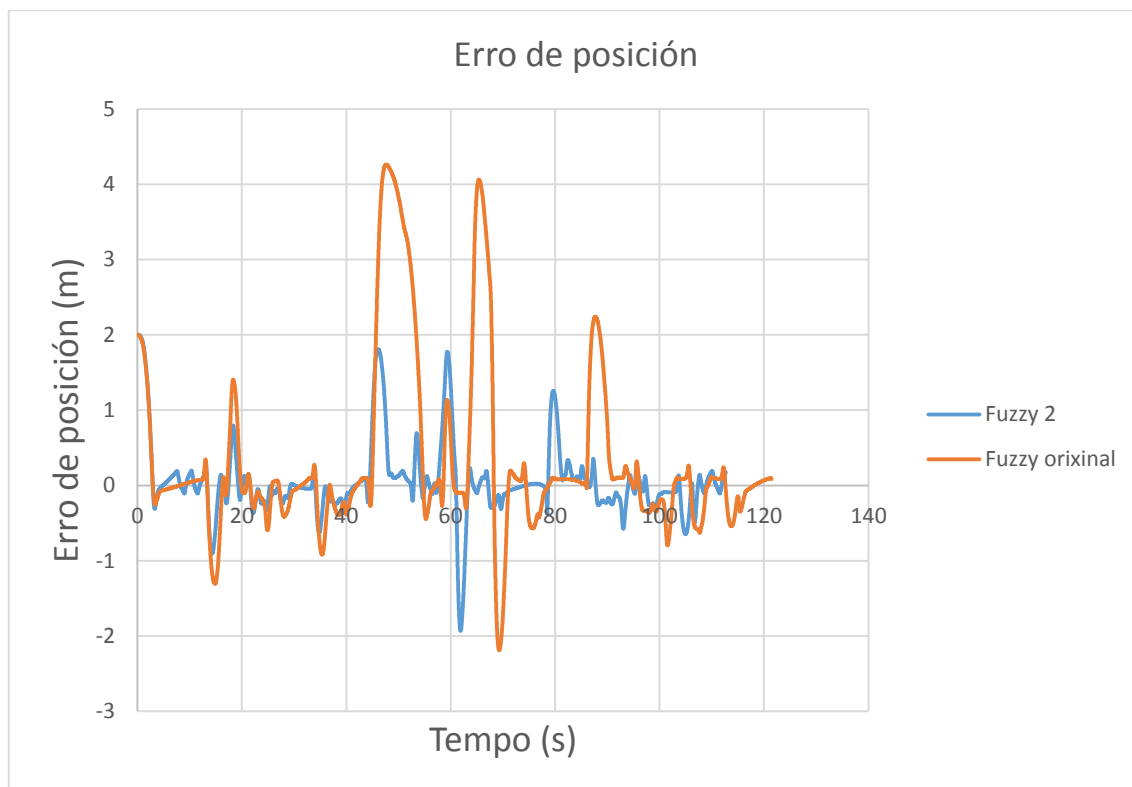
Onde:

- O termo “+” indica que o xiro do volante sexa á dereita, e a numeración indica de forma ascendente un maior xiro deste.
- O termo “-” indica que o xiro do volante sexa á esquerda, e a numeración indica de forma ascendente un maior xiro deste.
- O termo “0” indica que non haxa xiro de volante.

O controlador estará composto por 49 regras. O mapa de saída do controlador ten unhas transicións máis suaves con respecto ao controlador fuzzy 1 debido a un maior aumento de conxuntos borrosos, e por tanto número de regras. Obtense o seguinte mapa de saída da Imaxe 57.



Imaxe 57 Superficie de control xerada polas regras de actuación sobre o volante



Imaxe 58 Erro de posición do controlador Fuzzy 2 fronte ao orixinal

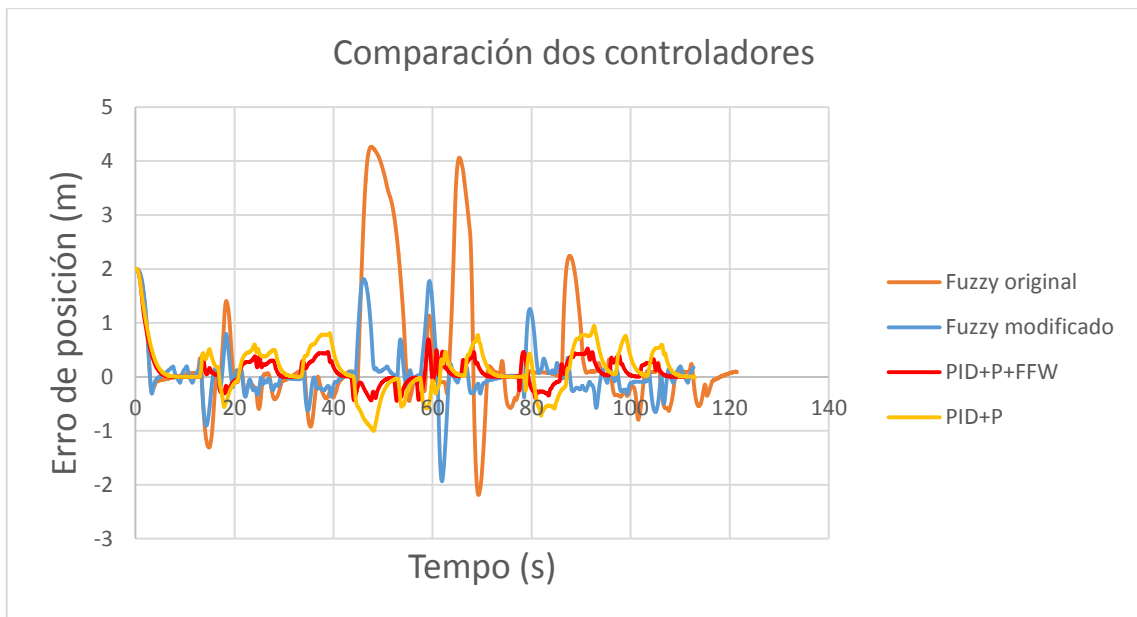
Controlador	Fuzzy orixinal	Fuzzy 2
Tempo por volta (s)	121.44	112.71
Erro máximo (m)	4.26	1.93
Erro cuadrático medio (m)	1.23	0.5

Táboa 13 Resultados obtidos do controlador Fuzzy 2

Unha vez deseñado o controlador e implementado na simulación, conséguese manter o prototipo na estrada, completando así o circuito. Pódese ver na Imaxe 58 un comportamento similar ao controlador Fuzzy inicial neste programa. Mellora claramente reducindo os erros de posición medios en máis da metade do controlador inicial, e tamén o tempo por volta.

4.6.7 Comparación dos controladores

Unha vez obtidos todos os resultados das simulacións, debemos de elixir cales deles son axeitados para mellorar o sistema. Os valores que hai que comparar serán, como nas simulacións: o tempo por volta en segundos, el erro máximo en metros e o erro cuadrático medio en metros. Para unha mellor comparación dos controladores, mostraremos o resumo das simulacións na la Táboa 14 e os erros acumulados ao longo da volta se amósase na Imaxe 59.



Imaxe 59 Erro de posición para os distintos controladores

Controlador	Tempo por volta (s)	Erro máximo (m)	Erro cuadrático medio (m)
Fuzzy orixinal	121.45	4.26	1.23
PD	119.62	4.59	1.03
PID	117.32	3.77	0.79
PID + P	112.98	1.00	0.46
PID + PD	113.11	1.03	0.48
PID + P + FFW	111.09	0.70	0.32
Fuzzy 1	132.09	4.05	1.8
Fuzzy 2	112.71	1.93	0.5

Táboa 14 Comparación de todos os controladores desenvolvidos

Á vista dos resultados, os mellores controladores son o “PID + P”, o “PID + P + FFW” e o “Fuzzy 2”, posto que tanto o tempo por volta como o erro cuadrático medio están moi próximos e son inferiores ás outras probas. El erro máximo mínimo é o do controlador “PID + P + FFW”.

A continuación, cos mellores controladores feitos ata o momento faremos un novo axuste da velocidade máxima do vehículo. A velocidade nas rectas será maior e tamén o será a velocidade de entrada nas curvas. O aumento de velocidade máxima modifícase na función “GUIADA”.

Con este cambio comprobaremos a actuación do controlador a unha maior velocidade do vehículo para ver o seu funcionamento con este aumento. Poñeremos como límite

un erro máximo de 2 m a cada lado para ver que porcentaxe de velocidade podemos aumentar. Esta proba axúdanos a coñecer a robustez dos controladores e permite aclarar a elección do controlador final.

Os controladores que imos poñer a proba son:

- O controlador PID ao erro en posición e P ao erro angular.
- O controlador PID ao erro en posición, P ao erro angular e o término FFW.
- O controlador Fuzzy 2.

O resultado do aumento de velocidade é o da Táboa 15.

Controlador	Tempo por volta (s)	Aumento da velocidade (%)	Erro máximo (m)	Erro cuadrático medio(m)
Fuzzy orixinal	121.45	0.0 %	4.26	1.24
PID + P	104.3	15.0 %	2.00	0.49
PID + P + FFW	104.37	15.2 %	2.00	0.53
Fuzzy 2	111.57	3.0 %	2.00	0.57

Táboa 15 Resultados obtidos co aumento da velocidade máxima do vehículo

Á vista dos resultados, podemos ver que los controladores “PID + P” e “PID + P + FFW” son os que máis cambios na velocidade máxima poden asimilar, xa que permiten un aumento da velocidade máxima en torno ao 15 %. A velocidade máxima inicial na recta máis longa do circuíto estaba arredor dos 20 m/s (72 km/h); este aumento tradúcese agora en 83 km/h. O controlador “Fuzzy 2” permite o aumento do 3 %.

Unha vez visto isto, debemos discutir os dous mellores controladores feitos ata o momento, estes son os controladores “PID P FFW” e “Fuzzy 2”. A elección débese a que son dous controladores totalmente diferentes, cunha filosofía de actuación distinta. Son os que mellor tempo por volta realizan; reducen o erro cuadrático medio con respecto ao controlador orixinal un 74 % e un 60 % respectivamente. Cada tipo de controlador ten as súas vantaxes e desvantaxes e isto analizarase no seguinte capítulo.

4.6.8 Comparación entre o condutor virtual e un condutor humano

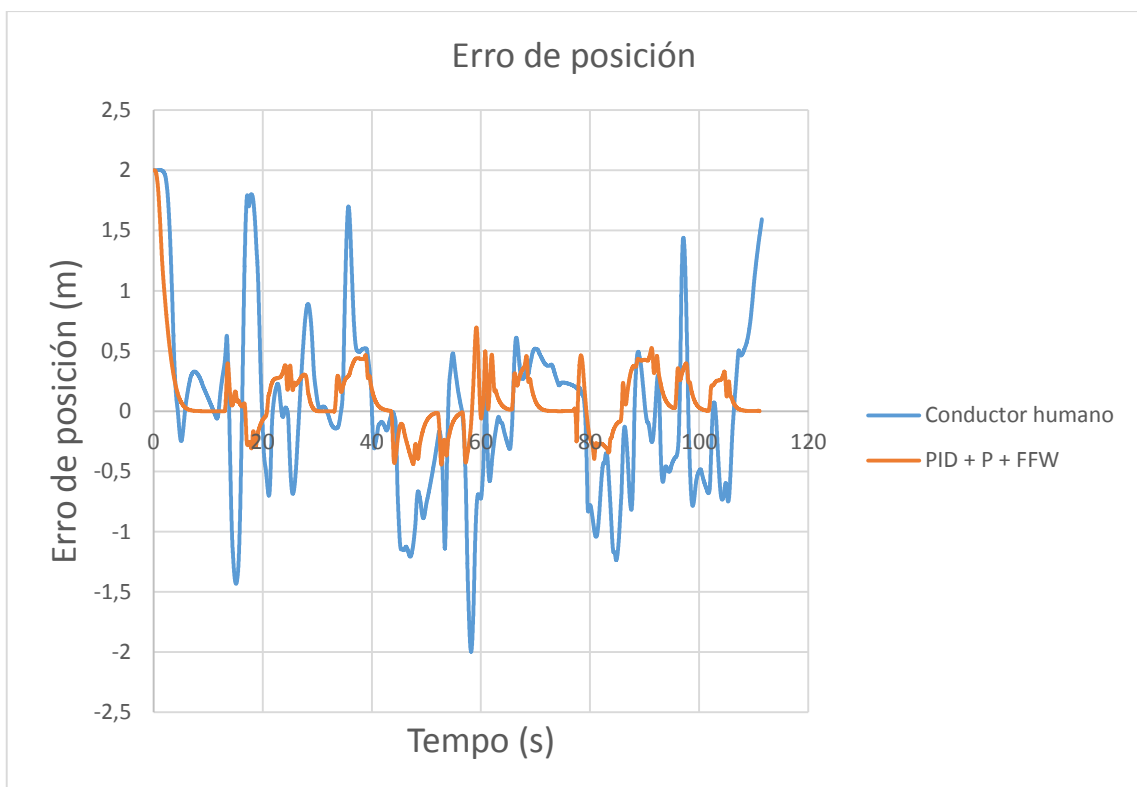
Comparamos o mellor controlador realizado, o “PID P FFW”, cun condutor humano. Así poderemos ver os resultados dun controlador virtual e saber se mellora os resultados obtidos cunha conducción manual.

A condución humana realizouse no mesmo simulador na función de condución manual e coa axuda dun mando.

Os resultados de erro ao longo da simulación móstranse na Imaxe 60. . Pódese ver claramente que o control automático mellora a condución humana, xa que reduce os erros pico que hai nas curvas, tamén reduce o erro cuadrático medio e o tempo por volta; todo isto móstrase na Táboa 16.

Controlador	Conductor humano	PID + P + FFW
Tempo por volta (s)	111.52	111.09
Erro máximo (m)	1.99	0.70
Erro cuadrático medio (m)	0.72	0.32

Táboa 16 Comparación de un conductor humano fronte a un controlador virtual "PID + P + FFW"



Imaxe 60 Erro de posición do controlador PID + P + FFW fronte a un conductor humano

5. Conclusións

Ao termo deste traballo de fin de grado pode afirmarse que se alcanzaron satisfactoriamente os obxectivos de investigación fixados. A continuación expóñense as conclusións do estudo e suxírense unhas posibles liñas para continuar o traballo posteriormente.

5.1 Conclusións

O obxectivo principal deste traballo foi utilizar un simulador multicorpo para deseñar, axustar e avaliar lazos de control que puidesen actuar como condutores virtuais. Logo dunha fase de avaliación inicial con modelos sinxelos, deseñáronse e implementáronse nun simulador de condución realista sete controladores diferentes. Estes poden agruparse en dous grandes tipos: controladores baseados en PIDs e controladores baseados en lóxica borrosa. Estes controladores utilizaron como variables de entrada o erro en posición e o erro en ángulo do vehículo con respecto á traxectoria de referencia.

Os esquemas de control realizados foron os seguintes:

- PD: un único controlador que recibe como entrada o erro de posición do vehículo, con actuación proporcional e derivativa.
- PID: un único controlador que recibe como entrada o erro de posición do vehículo, con actuación proporcional, derivativa e integral.
- PID P: dous controladores superpostos, o primeiro dos cales é un PID completo que recibe como entrada o erro en posición do vehículo, e o segundo exerce unha actuación proporcional ao erro angular.
- PID PD: dous controladores superpostos, o primeiro dos cales é un PID completo que recibe como entrada o erro en posición do vehículo e o segundo exerce unha actuación proporcional e derivativa en función do erro angular.
- PID P FFW: un esquema idéntico ao PID P no que se engadiu un término feed-forward ao PID que actúa sobre o erro en posición. Este término prevé o estado que terá o sistema no futuro. Implementar este término foi complexo, analizando distintos sistemas do prototipo virtual, pero mellora de bo xeito o seguimento da referencia.
- Fuzzy 1: un controlador borroso que recibe como entradas o erro de posición e o erro angular do vehículo. A primeira entrada consta de 7 conxuntos borrosos, a segunda de 5 o que conleva a un total de 35 regras no controlador.
- Fuzzy 2: un controlador borroso que recibe como entradas o erro de posición e o erro angular do vehículo. A primeira entrada consta de 7 conxuntos borrosos, a segunda de 7 o que conleva a un total de 49 regras no controlador.

Como banco de ensaios utilizouse o simulador de condución do Laboratorio de *Ingeniería Mecánica* da UDC. O seu modelo virtual implementado serviu como base para desenvolver estes controladores. Resolveuse satisfactoriamente a interacción do vehículo cunha contorna que representa o *Circuíto de Cataluña*. O simulador facilita a obtención de valores empregados como parámetros do controlador e permite obter os datos durante as simulacións para mellorar o control.

Neste traballo establecéronse as características da traxectoria que son necesarias para poder seguila. As propiedades da traxectoria son coñecidas ou pódense coñecer: a proxección sobre a traxectoria da posición actual do vehículo ou a proxección deste vehículo adiantado uns metros. Sobre a proxección na traxectoria requírese coñecer as súas coordenadas “x” e “y” sobre calquera orixe, a dirección da traxectoria nese momento ou o cambio de curvatura ao longo da simulación.

Todos os algoritmos de control realizados permiten que o vehículo leve a cabo un seguimento de traxectoria aceptable en todos os tramos do circuíto, con diferentes radios de curva e rectas. Os controladores baseados en PIDs realizan un bo traballo para reducir o erro do sistema, e desempeñan un bo comportamento ante cambios de estado do sistema, por exemplo o aumento de velocidade máxima. O controlador borroso Fuzzy 2 tamén mantén de xeito correcto o prototipo, pero ante estes cambios mostra unha menor eficacia.

Todos os controladores desenvolvidos, “PID + P FFW”, “PID + P” e “Fuzzy 2” melloran notablemente a actuación con respecto ao controlador fuzzy implementado orixinalmente no simulador, reducindo os erros medios en máis dun 50 %, e como consecuencia, reducindo tamén o tempo por volta ao circuíto.

Unha vantaxe dos controladores baseados en PIDs foi o seu rápido axuste ao longo das simulacións, malia que na teoría é un axuste difícil e sofisticado, e aínda máis nun trazado onde hai moitos cambios de curvatura. Tamén hai que destacar que implementar un control PID no simulador é sinxelo: basta con axustar as ganancias correspondentes e avaliar as derivadas e integrais das variables de entrada. Os controladores borrosos foron elaborados mediante Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, e unha avaliación posterior na fiestra de traballo de Matlab, para obter os valores de saída e empregalos no simulador de Fortran. Isto axuda a que o tempo de execución se reduza á hora de avaliar os controladores durante a simulación. A sintonización e implementación dun controlador difuso no simulador de condución é máis complexa. Necesítase de máis tempo para a creación dos seus conxuntos borrosos e regras; e a súa implementación no simulador é máis laboriosa.

Os criterios empregados para a comparación e avaliación dos controladores foron 3: o erro máximo obtido a longo da volta ao circuíto, o erro cuadrático medio dos erros acumulados e o tempo por volta.

De todos os controles desenvolvidos o que mellor resultado dou foi o “PID + P + FFW” xa que é o que consegue menor erro máximo, menor erro cuadrático e menor tempo de volta. Posteriormente este controlador for comparado cun condutor humano, de onde saíron resultados excelentes xa que os criterios de comparación do condutor virtual son mellores ca os do condutor humano.

5.2 Traballo futuro

O simulador de condución proporciona un bo número de liñas a seguir, tanto no tema de controladores como no tema de características do prototipo virtual, como:

- Analizar o comportamento do sistema fronte a perturbacións externas nun sistema real, como poden ser pequenos erros de medida nos sensores; rapidez de actuación dos motores de acelerador, freo e xiro de volante. Estes puntos son importantes para implementar os controladores na realidade.
- Analizar a relación entre o xiro do volante e a capacidade de xiro do prototipo real e implementalo no prototipo virtual, xa que no simulador a relación destas dúas variables é puramente lineal, cousa que na realidade non é así.
- Implementar os controladores deseñados no simulador ao prototipo real, facendo as modificacións pertinentes para a toma de datos e o correcto funcionamento destes. A simulación difire bastante da realidade nalgúns aspectos e non sempre temos os medios necesarios para a toma de erros que poidan estar definidos nunha simulación.
- Considerar outras definicións para a entrada dos controladores e comparar o seu comportamento con respecto aos resultados actuais, como pode ser a aceleración do vehículo ou o coñecemento total do circuíto.
- Desenvolver outras técnicas de control, como as técnicas de control adaptativo, redes neuronais, algoritmos xenéticos, ou aprendizaxe dirixida, utilizando a manobra levada a cabo polo condutor humano no simulador como referencia para o axuste do controlador.

6. Bibliografía

- [1] Miguel Ángel Naya Villaverde. *Aplicación de la Dinámica Multicuerpo en Tempo Real a la Simulación y el Control de Automóviles (Tesis doctoral de la Universidad da Coruña)*. Ferrol, 2007.
- [2] Jorge Juan Gil Nobajas y Ángel Rubio Díaz-Cordovés. *Ingeniería de control-Control de sistemas continuos*. Segunda edición. San Sebastián, 2004.
- [3] Germán Theler. *Controladores basados en lógica difusa y loops de convección natural caóticos*. San Carlos de Bariloche, 2007.
- [4] Holly Moore. *Matlab para ingenieros*. Primera edición. Salt Lake City – Utah, 2007.
- [5] Miguel Alcubierre. *Introducción a Fortran*. México, 2005.
- [6] S. Shladover “Automated vehicles for highway operations (automated highway systems)”, *Proc. ImechE, Part I: J. Systems and Control Engineering*, vol. 219, pp. 53-75, 2005.
- [7] Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli and G. Conte, *Automatic vehicle guidance: the experience of the ARGO autonomous vehicle*, World Scientific, 1999.
- [8] Tsugawa, T. Yatabe, T. Hirose and S. Matsumoto, “An automobile with artificial intelligence,” *Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, Tokyo, Japan, pp. 893-895, 1979.