

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
HÁPTICO PARA EL CONTROL DE UN MOTOR DE
CORRIENTE CONTINUA**

David Sánchez Delgado

2014

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

Reunido el tribunal examinador en el día de la fecha, constituido por

Presidente: Dr D. Félix Monasterio-Huelin Maciá

Vocal: Dra D^a. María Elena Hernando Pérez

Secretario: Dr D. Álvaro Gutiérrez Martín

Suplente: Dr D. Carlos González Bris

para juzgar el Proyecto Fin de Carrera titulado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÁPTICO
PARA EL CONTROL DE UN MOTOR DE CORRIENTE
CONTINUA**

del alumno D. David Sánchez Delgado

dirigido por D. Álvaro Gutiérrez Martín

Acuerdan otorgar la calificación de: _____

Y, para que conste, se extiende firmada por los componentes del tribunal, la presente diligencia

Madrid, a _____ de _____ de _____

El Presidente

La Vocal

El Secretario

Fdo: _____ Fdo: _____ Fdo: _____

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS ESPECIALES
APLICADAS A LA TELECOMUNICACIÓN**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
HÁPTICO PARA EL CONTROL DE UN MOTOR DE
CORRIENTE CONTINUA**

**Autor:
David Sánchez Delgado**

**Director:
Álvaro Gutiérrez Martín**

2014

Resumen

El presente Proyecto Final de Carrera está motivado por la realización de una primera aproximación a un sistema háptico usando dos motores de corriente continua y un grado de libertad. Realizando una realimentación por corriente controlada por un microcontrolador ARM y soportada desde un entorno Linux.

La idea principal del proyecto no es otra que acercarse de una forma práctica al mundo de los sistemas hápticos, para conseguir un primer modelo sistema háptico completo, en el cual tengamos un lazo de control cerrado.

El sistema háptico está formado por dos motores de corriente continua que cumplen la función de maestro y esclavo, de los cuales tenemos información de su corriente, así como de su posición y velocidad. Con ayuda de estos parámetros conseguimos realizar un estudio del comportamiento de los motores respecto al movimiento y relación con su corriente. Con esto y con ayuda de los controladores desarrollados, implementados en el microcontrolador ARM, conseguimos nuestro objetivo, una primera aproximación funcional de un sistema háptico completo.

PALABRAS CLAVE: Háptico, Realimentación de fuerzas Motor Dc, realimentación de corriente, controlador.

Agradecimientos

Muchas gracias a todos.

Índice general

Resumen	VII
Agradecimientos	IX
Índice General	X
Índice de Figuras	XII
Índice de Tablas	XIV
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Organización del proyecto	2
2. Sistemas Hápticos	5
2.1. Sistemas de vibración	9
2.2. Pantallas de superficie	10
2.3. Superficies táctiles distribuidas	10
2.4. Sistemas de realimentación por fuerza	11
2.5. Ejemplos de hápticos comerciales	12
3. Realimentación de fuerzas	19
3.1. Realimentación de Impedancias	20
3.2. Realimentación de Admitancias	22
3.3. Sistemas híbridos	22
4. Hardware	23
4.1. Arquitectura Hardware	23
4.1.1. Placa de Motores	24
4.1.2. Motores DC	27

4.1.3. Encoder Óptico	30
4.1.4. Reductora	32
5. Software	35
5.1. Arquitectura software	35
5.2. Temporización de tareas	36
5.3. Comunicación serie	39
5.4. Controladores	40
5.4.1. Controlador maestro	40
5.4.2. Controlador esclavo	48
6. Experimentos	51
6.1. Hito 1: Controlador esclavo	51
6.2. Hito 2: Impedancia del motor	52
6.3. Hito 3: Controlador maestro. Aproximación Lineal	54
6.4. Hito 4: Controlador maestro. Aproximación exponencial	56
6.5. Hito 5: Controlador maestro. Aproximación logarítmica	59
6.6. Hito 6: Controlador maestro. Aproximación polinómica de grado 3) . .	62
7. Conclusiones y líneas futuras	67
7.1. Conclusiones	67
7.2. Líneas futuras	72
7.2.1. Hardware	72
7.2.2. Software	72
Bibliografía	75

Índice de figuras

2.1. Mono buscando refugio de “madre” de trapo. A la derecha la “madre” de alambre que tenía el alimento. Imagen de la revista LIFE publicación del 18 de Noviembre de 2002	6
2.2. Motorola Star Tac 85 uno de los primeros móviles que usaron la vibración.	10
2.3. Mando PS4, último mando con vibración disponible en el mercado.	10
2.4. Pantalla de superficie controlada por servo-motores.	11
2.5. Persona leyendo gracias al sistema braille.	11
2.6. Representación del palo imaginario en la realimentación de fuerzas.	12
2.7. Optacon	13
2.8. Matriz de varillas	13
2.9. Muestra de los 6DOF de Omni	14
2.10. Varios ejemplos de usos del dispositivo Desktop.	14
2.11. Exquema explicativo del Rutgers Master II	15
2.12. HapticMaster	16
2.13. Omega.7 en disposición bimanual.	17
2.14. Sigma.7.	17
3.1. Nuevo diagrama de realimentación.	19
3.2. Diagrama de bloques que representa de forma muy sintética la realimentación Impedancias y la de admitancias	21
4.1. Diagrama de bloques de la arquitectura hardware.	23
4.2. Fotografía de la tarjeta cedida por RBZ Robot Design.	24
4.3. Figura de un puente H esquemático	25
4.4. Figura del esquemático del filtro Sallen-Key	26
4.5. Esquemático e imagen del encoder HEDS 5540	30
4.6. Esquemático del funcionamiento de un encoder óptico	31
4.7. Esquemático e imagen del encoder HEDS 5540	32
4.8. Curva epicicloide.	33
4.9. Curva hipocicloide.	33

4.10. Esquema de una reductora genérica.	34
5.1. Diagrama de bloques de la arquitectura software.	35
5.2. Logo de FreeRTOS.	36
5.3. Exquema de estados de una tarea en FreeRTOS.	38
5.4. Trama de comunicación serie.	39
5.5. Funcion V-I.	42
5.6. Funcion V-I modificada.	42
5.7. Funcion general de una función smith tregger.	43
5.8. Diagrama de bloques de la programación del controlador maestro. . .	44
5.9. Grafica del controlador exponencial.	46
5.10. Grafica del controlador logaritmico.	47
5.11. Grafica del controlador x^3	48
6.1. Posiciones de los motores siguiéndose.	52
6.2. Posiciones de los motores siguiéndose incluyendo el error.	52
6.3. Comparativa de los errores	52
6.4. Gráficas de corriente con y sin impedancia del motor maestro	53
6.5. Gráfica de respuesta a la aproximación lineal	55
6.6. Gráfica de respuesta a la aproximación lineal	57
6.7. Gráfica de respuesta a la aproximación exponencial	58
6.8. Gráfica de respuesta a la aproximación logarítmica	60
6.9. Gráfica de respuesta a la aproximación logarítmica	61
6.10. Gráfica de respuesta a la aproximación polinómica de grado 3	63
6.11. Gráfica de respuesta a la aproximación polinómica de grado 3	64
7.1. Comparativa de gráficas de los diferentes controladores implementados	71

Índice de tablas

4.1. Posiciones de puente H	25
4.2. Parámetros del motor DC	27
4.3. Pines encoder	32
5.1. Valores del “Smith Trigger”	44

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Motivación

El presente Proyecto Final de Carrera está motivado por la realización de una primera aproximación a un sistema háptico sobre dos motores de corriente continua y un grado de libertad. Los motores forman un sistema de motores maestro-esclavo en el cual el maestro guía al esclavo. El esclavo es el encargado de sensar su propia corriente de forma que puede transmitir estos valores al maestro. Esta comunicación permite que el maestro realice en consecuencia las acciones que le corresponden. Estas acciones que realiza el maestro son las necesarias para que el usuario pueda percibir la realimentación de fuerzas objetivo. El usuario recibirá la realimentación de la que hablamos producida por el lazo cerrado del sistema. Esta realimentación de fuerzas esta en todo momento dirigida por los controladores implementados en el microcontrolador ARM y soportado desde el entorno Linux.

1.2. Objetivos

Los objetivos principales del presente Proyecto Final de Carrera son:

- Estudio de los sistemas hápticos, de forma global, conociendo sus características y singularidades.
- Estudio de un controlador proporcional integral derivativo (*PID* en sus siglas

en inglés) para ajustar la sensibilidad de nuestro sistema háptico.

Tras conseguir un nivel adecuado de conocimiento, comenzaremos con la implementación de un sistema háptico básico, en el cual el usuario sea capaz de discernir diferente cantidad de fuerza realimentada, y sienta de forma aproximada la generación de fuerzas en uno de los extremos de nuestro sistema.

Los objetivos de esta implementación son:

- Realización de un sistema de control de impedancias en el cual controlamos la corriente que circula por uno de los motores.
- Realización de un sistema de control de admitancias en el cual controlamos la posición a la que se mueve el motor.
- Integración de ambos sistemas como uno solo, convirtiéndose así en un sistema háptico.

Finalmente se analizarán las limitaciones de nuestro sistema en cuanto a precisión y respuesta en tiempo real.

1.3. Organización del proyecto

En el Capítulo 1 se ha descrito la motivación, los objetivos de este Proyecto Fin de Carrera así como la organización del proyecto.

En el Capítulo 2 se ha descrito una pequeña introducción los sistemas hápticos, describiendo distintas clasificaciones, así como la importancia de lo háptico en el ser humano.

En el Capítulo 3 se realiza una introducción a los sistemas realimentados de fuerza, centrándose en los sistemas de admitancia e impedancia.

En el Capítulo 4 se describen la arquitectura del hardware utilizada así como las especificaciones puntuales de alguna de sus partes que se hacen indispensables para la comprensión de algunas decisiones tomadas para el desarrollo de nuestro sistema háptico.

En el Capítulo 5 se explica la arquitectura software del sistema y se describen tanto la temporización de las tareas como los controladores.

En el Capítulo 6 se especifica de forma detallada los dos experimentos realizados.

El Capítulo 7 muestra las conclusiones y líneas futuras de trabajo.

Capítulo 2

Sistemas Hápticos

La palabra háptico proviene del antiguo griego $\alpha\pi\tau\omega$ (háptō) que significa “perteneciente al sentido del tacto” que a su vez viene del verbo griego $\alpha\pi\tau\epsilon\theta\alpha\iota$ (haptikós) que significa “contactar” o “tocar” [Wiki, May 2014].

Para que nos hagamos una idea de la importancia de los sentidos hápticos tenemos que tener en cuenta que son los primeros que se desarrollan en el feto. Muchos estudios hablan sobre la dificultad de los bebés de sobrevivir sin el sentido del tacto incluso teniendo los sentidos de la vista o el oído. Un bebé sin estos dos sentidos pero con el sentido del tacto tiene muchas más posibilidades de sobrevivir.

Me gustaría remarcar un estudio de los años 60 realizado por un investigador estadounidense llamado *Harry Harlow*. En ese estudio se remarca la importancia de la percepción háptica en nuestro desarrollo evolutivo. [Harlow HF, 1965]

El estudio se realizó con monos. Creó lo que se conoce como “madre sustituta”, que no se trataba más que de muñecos contruidos de dos diferentes maneras. La primera “madre” eran de alambre y tenían comida, y la segunda “madre” sustituta estaba hecha con felpa pero no tenía alimentos. El experimento era claro, Harlow se percató de que las crías preferían a la “madre” de felpa aunque esta no pudiera darles el alimento. De esta forma se demostraba que el vínculo entre “madres” y crías era mucho más fuerte que el mero hecho de la alimentación. Las crías poseían una necesidad innata de establecer contacto para desarrollarse de forma Psicológica. Harlow también exponía a las crías a situaciones de estrés como un nuevo hábitat,

y estas buscaban el cobijo en las “madres” de felpa, con las que se sentían más protegidas. La seguridad que transmitían las “madres” de felpa hacía que las crías fueran capaces de explorar, acudiendo al cobijo de la “madre” de felpa, para asegurarse su “sitio seguro”. En el momento en que Harlow separaba a las crías de las “madres” y las llevaba a nuevos contextos, comenzaban a mostrar síntomas de ansiedad: lloraban, gritaban, se chupaban el dedo y buscaban objetos suaves como su “madre”. Cuando las volvía a depositar en la jaula original en la que estaba la “madre” de felpa, las crías de mono se iban directas a ellas y permanecían inmóviles a su lado, reticentes a abandonarlas.



Figura 2.1: Mono buscando refugio de “madre” de trapo. A la derecha la “madre” de alambre que tenía el alimento. Imagen de la revista LIFE publicación del 18 de Noviembre de 2002

Harlow no solo se quedó ahí sino que realizó el estudio contrario, recluyó a los monos en unas jaulas totalmente aisladas, denominadas el abismo de la desesperación. Aquí los sujetos no recibían ningún tipo de estimulación sensorial. Las cajas estaban compuestas de una caja con comida, un bebedero y un espejo unidireccional para

poder observar a los sujetos. Se las enjaulaba a poco de nacer y tras 30 días ya se notaban claras alteraciones en la conducta tales como nerviosismo y confusión. Tras un año se podía percibir cierta catatonía, permanecían inmóviles en una esquina. Cuando se les introducía con el grupo de control(un grupo formado por animales creados en cautiverio pero de forma “normal”) estos monos no mostraban conductas exploratorias, eran agredidos y no mostraban interés por el sexo opuesto. Alguno incluso dejó de alimentarse y de este modo morían de inanición. [Blum, 2002]

Cuando Harlow comprobó que el aislamiento afectaba a la conducta social, Harlow decidió analizar si estos efectos se podrían encontrar en la interacción madre-cría. Encontró que las hembras eran incapaces de proporcionar cuidados a las crías, de hecho sólo les ofrecían un trato despectivo y negligente.

Estos experimentos demostraron que la necesidad de contacto y protección es instintiva en las crías, siendo esta sensación de afecto y seguridad más importante para las crías que el propio alimento.

Continuando con la definición general de Háptico, debemos resaltar el hecho de que muchas veces hablamos de canales hápticos porque existen ciertas partes anatómicas, como la mano, que son consideradas órganos unitarios en los que no se puede separar la percepción de la acción. Si por ejemplo nosotros tenemos que sujetar un objeto cualquiera, el cual desconocemos, siempre realizamos una exploración activa.

Siguiendo con lo introducido en el párrafo anterior, podemos percatarnos que las líneas de trabajo en este campo son principalmente dos: [Monasterio-Huelin, 2013]

- Sensibilidad cutánea: es la sensibilidad que nuestro cuerpo experimenta ante la temperatura, el dolor o la presión.
- Sensibilidad cinestática: es la sensibilidad que se origina en los músculos, articulaciones o tendones e informa sobre el movimiento del cuerpo.

En nuestros días, tras la inclusión de la tecnología en la vida cotidiana, cada día es más normal hablar de sistemas hápticos, que no son más que sistemas que tienen algún tipo de realimentación táctil que recrean el sentido del tacto aplicando fuerzas

o vibraciones para el usuario. El objetivo ideal del sistema háptico es que el usuario no distinga entre lo real y lo virtual. Este tipo de sistemas no para de proliferar ya que mejora la interacción, obteniendo un sentido de presencia y aumentando la destreza en entornos virtuales. Los dispositivos hápticos tienen varias clasificaciones, a continuación enunciaremos dos de ellas:

Una de estas clasificaciones diferencian los dispositivos según el lazo de realimentación:

- Dispositivos hápticos pasivos: sin realimentación (lazo abierto).
- Dispositivos hápticos activos: con realimentación (lazo cerrado).
 - Isométricos: los actuadores actúan como una fuente de posición y se mide la fuerza.
 - Isotónicos: los actuadores actúan como una fuente de fuerza.

Continuando con las clasificaciones existe otra que diferencia los sistemas hápticos según el entorno en el que están trabajando:

- Entornos físicos: en este caso el sistema háptico realiza su lazo, ya sea abierto o cerrado, sobre dos dispositivos o dos actuadores que son reales y por tanto podemos tocar. En ambos las fuerzas que realizamos o las fuerzas que recibimos son reales y existentes.
- Entornos virtuales: en este otro caso el sistema háptico está compuesto por alguna parte simulada, la cual no es física. Estos entornos simulados suelen ser imitaciones de la realidad, la cual ha sido previamente modelada para crear una realidad ficticia virtual.

Tenemos que tener en cuenta a la hora de realizar estos entornos que la frecuencia con la que se realizan los movimientos del sistema motor humano son frecuencias inferiores a los 10 Hz. En cambio el sistema de percepción humano varía entre los 0 y 1 kHz con una sensibilidad de 250Hz.

En nuestra sociedad de la información, transformada en la sociedad de las redes de comunicación, que ha alcanzado un nivel de abstracción muy alto, se encuentra con una contradicción ya que evolutivamente somos animales físicos que dependemos del contacto para funcionar y comunicarnos. Por ello aparece esta nueva tecnología capaz de afrontar esta contradicción y que debería servir de guía para todos los avances de la tecnología de la información.

Aparte de todo esto, si nos paramos a pensar estamos generando otro valor diferencial a todos estos sistemas hápticos, que no solo son sensitivos y auditivos. Vivimos siendo parte de un sistema que debido a la gran cantidad de información ha saturado nuestros sentidos de visión y audición. Entonces podemos llegar a comprender que los sistemas hápticos no solamente van a generar un mayor grado de fidelidad al mundo real, sino que se convierten en el tercer canal por el que transmitir información.

Actualmente existen muchos sistemas los cuales generan una respuesta real ante una realidad virtual o simulada. El campo donde están proliferando de manera creciente este tipo de dispositivos es en el mundo de los videojuegos, desde los primeros Joysticks hasta los actuales asientos y volantes vibratorios que simulan las carreras de coches.

Ésta no es la única aplicación para todos estos sistemas, existe actualmente un mercado creciente en la telemedicina, en sistemas de ayuda a la persona, tanto al enfermo como a la persona que lo trata.

Se han propuesto muchos métodos para la representación de las sensaciones hápticas artificiales. Ahora mismo predominan cuatro: sistemas de vibración, pantallas de superficie, superficies táctiles distribuidas y sistemas de realimentación por fuerza [Hayward and Maclean, December 2007], que se describen a continuación.

2.1. Sistemas de vibración

Se basan en la vibración de elementos del sistema. Representan la forma de realimentación háptica mas fácil que existe en la actualidad, hasta el punto que ya



Figura 2.2: Motorola Star Tac 85 uno de los primeros móviles que usaron la vibración.



Figura 2.3: Mando PS4, último en el mercado.

estamos todos acostumbrados a ellos en los móviles, o smartphones, ver figura (2.2), que generan esa pequeña vibración para generar avisos, alertas o mensajes.

Pero no sólo en estos sistemas aparece, sino que también aparece en el mundo de los videojuegos, donde es muy común apreciar esta realimentación. De esta manera los desarrolladores de juegos no sólo se sirven de la vista y el oído para generar interacción con el usuario, haciendo estos cada vez más reales y generando un aumento de su popularidad. Ver figura (2.3).

2.2. Pantallas de superficie

Se basan en la observación de la sensación producida al tocar una superficie de forma aleatoria que puede lograrse mediante el control de un ordenador, detectando la posición del dedo y así interactuando. En la Figura 2.4 podemos ver una superficie de localización que opera controlada por servomotores en la yema del dedo.

2.3. Superficies táctiles distribuidas

El objetivo de éstas superficies es generar sensaciones directamente sobre las yemas de los dedos, que es una de las zonas con más sensibilidad háptica. En algunos casos se usa para replicar sensaciones como la de tocar superficies de forma real por ejemplo un texto en Braille (2.5). Aunque los avances en este campo están siendo bastante

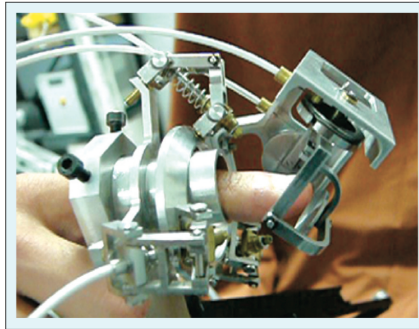


Figura 2.4: Pantalla de superficie controlada por servo-motores.

esperanzadores, todavía están lejos del objetivo final de generar sensaciones realistas, ahora simplemente podemos transmitir algunas de estas sensaciones.



Figura 2.5: Persona leyendo gracias al sistema braille.

Existen muchas posibilidades para este tipo de sistemas ya que no sólo estamos hablando de completar con un tercer sentido la capacidad de transmitir información, sino que en personas con una discapacidad de la vista tendrían una forma de “ver” a través de sus manos. Se habla mucho de los móviles capaces de representar braille.

2.4. Sistemas de realimentación por fuerza

¿De dónde viene el término fuerza de realimentación? En teleoperación, se acostumbra a designar el sistema teleoperador ideal como un sistema sin masa, un palo infinitamente rígido utilizado como una herramienta para trabajar a distancia (ver Figura 2.6). Debido a que el palo no tiene masa el operador sentirá en todo momento

el objeto que empuja a una determinada distancia como si el palo no existiera. La idea de la fuerza de retroalimentación en la realidad virtual es reemplazar el objeto real y el palo imaginario por un sistema de sensores y actuadores conectados a un ordenador. Si se mide el desplazamiento, d , en la herramienta que utiliza el usuario, y controlamos un motor para suministrar una fuerza, f_e , entonces teóricamente el usuario debe tener una experiencia perceptiva idéntica a la de empujar un objeto real.

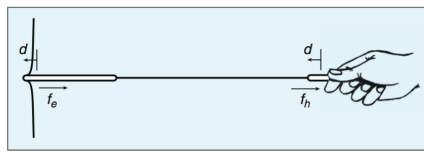


Figura 2.6: Representación del palo imaginario en la realimentación de fuerzas.

En el capítulo 3 veremos este método con un poco más de profundidad ya que es la idea principal de nuestra aproximación al sistema háptico realizado.

En este capítulo 2 incluiremos algunos ejemplos de sistemas hápticos que han aparecido o actualmente se comercializan.

2.5. Ejemplos de hápticos comerciales

- Optacon

El Optacon del inglés “OPTical to TActile CONverter” es un dispositivo electromecánico que permite a las personas ciegas leer material impreso que no ha sido transcrito al Braille. [Goldish and Taylor, 1974]

Como podemos ver en la figura 2.7 el Optacon tiene principalmente dos módulos. La unidad electrónica principal contiene la “superficie táctil” donde la persona ciega coloca su dedo índice. El usuario mueve el segundo módulo del Optacon que posee la cámara por una línea impresa y esta cámara transmite a través del cable la imagen del tamaño de una letra hasta la unidad electrónica principal. El

conjunto táctil en la unidad electrónica principal que podemos ver en la figura 2.8 contiene una matriz de 24 por 6 de varillas metálicas pequeñas, cada una de las cuales puede ser vibrada de forma independiente. Las varillas que se hacen vibrar corresponden a las partes negras de la imagen, formando así la imagen táctil de la letra que se está viendo en la cámara. A medida que el usuario mueve el módulo de la lente a lo largo de la línea de impresión, se sienten imágenes táctiles de letras en la matriz de varillas en el dedo del usuario.

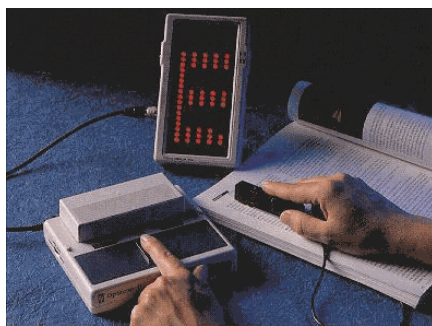


Figura 2.7: Optacon

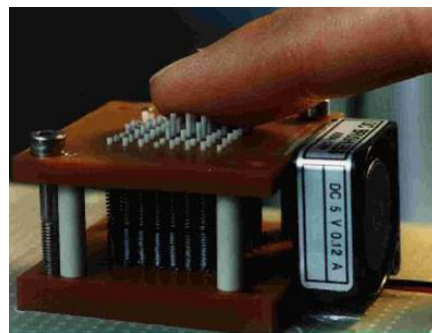


Figura 2.8: Matriz de varillas

- SensAble Tecnologías PHANTOM®

La línea de productos SensAble Tecnologías PHANTOM® de dispositivos hápticos hace posible que los usuarios toquen y manipulen objetos virtuales. Diferentes dispositivos PHANTOM pueden satisfacer diversas necesidades. Las versiones Premium son instrumentos de alta precisión y, dentro de la línea de productos PHANTOM, proporcionan los mayores espacios de trabajo y de las fuerzas más altas, y algunos ofrecen 6DOF¹ (6 grados de libertad). [SenseGraphics]

Algunos de los modelos son los que podemos ver en las siguientes Figuras:

En la figura 2.9 vemos el dispositivo “Omni” el cual proporciona realimentación

¹Número mínimo de parámetros que necesitamos especificar para determinar completamente la velocidad de un mecanismo o el número de reacciones de una estructura.

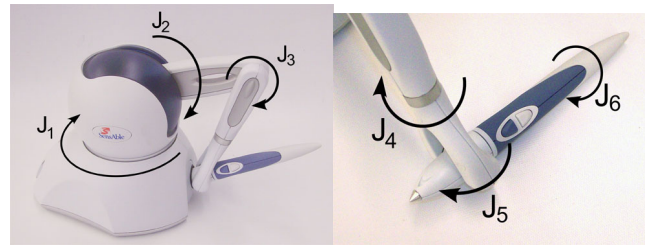


Figura 2.9: Muestra de los 6DOF de Omni

de fuerza y posee seis grados de libertad. Las aplicaciones que se pueden desarrollar con el Omni abarcan tanto simulaciones médicas como ejercicios de formación en los que el lápiz emula las sensaciones físicas, como sonar, pinchar, perforar o cortar, del uso de una jeringuilla, escalpelo, artroscopia y otros instrumentos médicos.



Figura 2.10: Varios ejemplos de usos del dispositivo Desktop.

En la figura 2.10 vemos el dispositivo “Desktop”. Este es un dispositivo todavía más completo y preciso que el anterior. Es un dispositivo usado en el modelado 3D y el diseño, la formación quirúrgica o el montaje virtual entre otros usos. Como podemos ver en la primera de las dos imágenes de la figura 2.10 permite a los residentes de cirugía realizar cirugías virtuales precisas y aprender la sensación de un procedimiento correcto antes de entrar en el entorno clínico. Como vemos en la segunda imagen también puede ser usado para la investigación.

- Rutgers Master II

El guante Rutgers Master II-ND es una interfaz háptica diseñada para interacciones de la mano derecha con entornos virtuales. [Mourad Bouzit and Boian, Jun 2002]

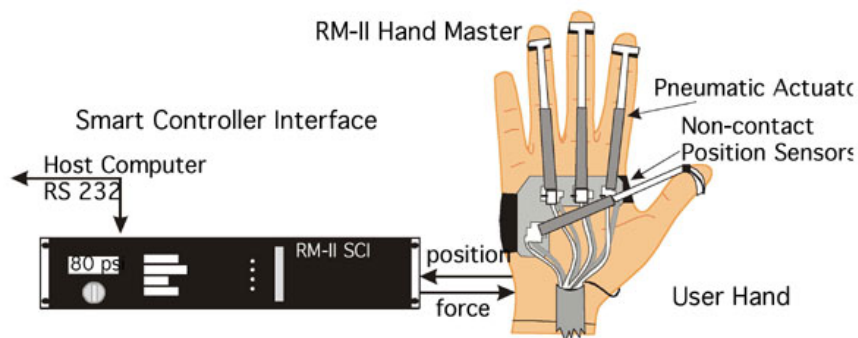


Figura 2.11: Exquema explicativo del Rutgers Master II

El guante ofrece una fuerza de respuesta de hasta 16 N cada uno de los dedos para los que está diseñado (pulgar, índice, medio y anular). Utiliza actuadores neumáticos dispuestos en una configuración de accionamiento directo en la palma. A diferencia de los guantes hápticos comerciales, los actuadores de accionamiento directo evitan cables innecesarios y poleas, y tiene como resultado una estructura más compacta y ligera.

El guante está conectado a una interfaz de control del háptico que lee sus sensores y actúa sobre los sevos. La interfaz tiene servoválvulas neumáticas, la electrónica de acondicionamiento de señales, placas de A / D / A, fuente de alimentación y un PC Pentium incrustado. Esta computación distribuida asegura un ancho de banda de control muy rápido. La comunicación con el PC host se realiza a través de una línea RS232.

- HapticMaster

Este dispositivo mecánico permite al usuario interactuar con el mundo virtual.

Permite al usuario sentir, tocar o manipular objetos tridimensionales en entornos virtuales. El HapticMaster tiene 3 grados de libertad. El brazo del robot programable utiliza el paradigma de control de admitancia (control de la fuerza). Es de los pocos que lo hacen, la gran mayoría utilizan el control de impedancia. [Virtual Reality] Ver figura 2.12.



Figura 2.12: HapticMaster

- Force Dimension

Force Dimension es otra compañía que se dedica al desarrollo de sistemas hápticos, a continuación veremos algunos de ellos [Dimension]:

El “omega.7” es posiblemente una de las interfaces hápticas de escritorio 7-dof más avanzadas del mundo. El “omega.7” está basado en el “omega.3”. El “omega.7” introduce alta precisión a las capacidades de agarre y posee un sensor de orientación. Es capaz de compensar la acción de la gravedad y la pinza realimentada por fuerza ofrece capacidades hápticas extraordinarias, lo que permite la interacción con aplicaciones hápticas complejas. Actualmente se utiliza en las industrias aeroespaciales y médicas por los operadores encargados de robots, su diseño altamente ergonómico y distintivo hacen del “omega.7” un dispositivo de elección para aplicaciones críticas para la seguridad. El “omega.7” está disponible en la configuración de mano izquierda y derecha y se puede

integrar en una configuración bimanual. Ver figura 2.13

También se comercializa el “sigma.7” parecido al anterior en características, con 7 grados de libertad, capaz de compensar la gravedad, y con la posibilidad de la doble configuración. Ver figura 2.14

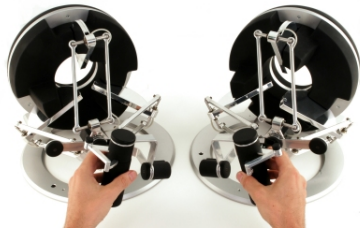


Figura 2.13: Omega.7 en disposición bimanual.



Figura 2.14: Sigma.7.

Capítulo 3

Realimentación de fuerzas

Para crear la sensación de tocar un objeto virtual, la superficie física en el teleoperador ideal, de la Figura 2.6, ha sido sustituido por el sistema representado en el diagrama de bloques en la Figura 3.1. Tal esquema ya se propuso a principios de 1957 para aplicaciones de acoplamiento molecular [F.P.Brooks Jr. and P.J.Kilpatrick, 1990], en 1971 para el diseño asistido por ordenador [Knoll, 1971], en 1978 para aplicaciones musicales [C.Cadoz and J.Florens, 1984], en 1984 para la atención de la salud [M.J.Rosen and B.D.Adelstein, 1984] y en 1990 en realidad virtual [H.Iwata, 1990]. Como podemos observar en los sistemas hápticos realimentados por fuerzas han sido objeto de estudio en diferentes campos, y han sido usados en multitud de aplicaciones.

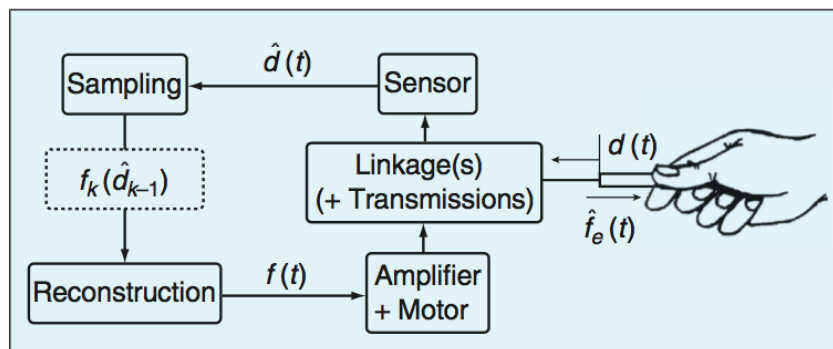


Figura 3.1: Nuevo diagrama de realimentación.

Como podemos ver en la figura 3.1 existe un lazo de realimentación de fuerzas cerrado en el cual podemos diferenciar distintas etapas.

- Una primera etapa donde gracias a los links y a las uniones y a las transmisiones somos capaces de sensar el desplazamiento, d que se esta produciendo por la accion del usuario.
- Una segunda etapa en la que existe un muestreo de esa d generada por los links.
- La siguiente etapa trata esta señal muestreada y realiza transformaciones sobre ella, traduciendo a la señal de fuerzas que queremos utilizar.
- Por ultimo esa funcion es reconstruida e inyectada en los motores que la tranmiten a los links y a los tranmisores que la haran llegar al usuario.

De esta manera recibe una sensación de fuerza producida por la realimentación en lazo cerrado que se genera.

Cuando hablamos de mecánica, decimos que un objeto tiene alta impedancia si es muy difícil de mover o deformar, es decir es pesado y/o duro. Uno de los principios fundamentales más importantes es que sólo un esfuerzo (tensión o fuerza) y flujo (corriente o velocidad) en un punto dado puede ser controlado de forma independiente, al presionar una masa con una determinada fuerza generamos una determinada velocidad, y de forma similar si movemos una masa con una determinada velocidad, esta es generada por una fuerza.

Dicho esto podemos ver dos tipos de realimentaciones, que vemos representadas en la Figura 3.2.

En las siguientes secciones se desarrollan los dos tipos de realimentación.

3.1. Realimentación de Impedacias

Este tipo de realimentación asume que el dispositivo responde a fuerzas realizadas por el usuario, como mostramos en la Figura 3.2. La ecuación de balance de fuerzas

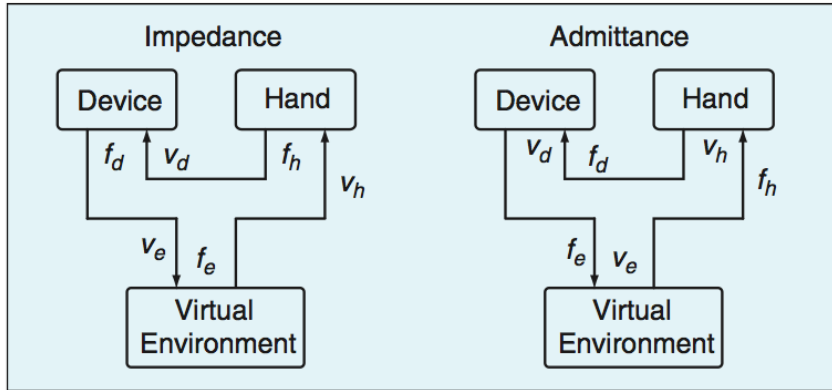


Figura 3.2: Diagrama de bloques que representa de forma muy sintética la realimentación Impedancias y la de admitancias

tiene que cumplir la formula de un circuito cerrado en el cual, tal y como indica la Figura 3.2 su formula seria la Ecuación 3.1 y el acoplamiento mecánico debería cumplir la Ecuación 3.2.

$$f_h + f_d + f_e = 0 \quad (3.1)$$

$$v_h = v_d = v_e \quad (3.2)$$

El entorno virtual es el que define la fuerza de los motores del dispositivo. Con este desarrollo, los usuarios sienten la combinación de fuerzas dinámicas y estáticas del dispositivo y el entorno simulado en respuesta a mover el dispositivo háptico. Se mide el desplazamiento y este es el que se tranforma y se traduce. Si el entorno virtual tiene una impedancia cero, lo que realmente siente el usuario es la masa y las fuerzas de fricción del propio dispositivo, pero su movimiento es en otro sentido sin resistencia.

A lo que tenemos que tender es a un dispositivo ideal, el cual tenga una impedancia mecánica innata baja y un amplio rango dinámico, ya que esto hace que el entorno virtual sea el único que realice fuerzas en el y así el usuario sienta más nítidamente la realimentación.

3.2. Realimentación de Admitancias

En la realimentación de admitancias, de forma análoga a realimentación de impedancias y siguiendo la estructura de la 3.2 la respuesta se produce por un desplazamiento realizado por el usuario, la fuerza realizada por el usuario al dispositivo se suministra al entorno virtual, siguiendo la formula 3.3. Y los elementos están enlazados de tal manera que cumplen la formula 3.4.

$$f_h = f_d = f_e \quad (3.3)$$

$$v_h + v_d + v_e = 0 \quad (3.4)$$

El dispositivo es controlado para seguir los desplazamientos del entorno virtual, por lo que debe sentir la fuerza en el punto de contacto del usuario así como sensar el desplazamientos para realizar el seguimiento de la posición. El usuario siente el desplazamiento y por tanto una respuesta del entorno simulado.

En este caso el dispositivo ideal tiene que tener una baja admitancia, es decir la capacidad de rápida aceleración ante respuestas a fuerzas muy pequeñas.

3.3. Sistemas híbridos

Tras las dos secciones anteriores podemos ver que tanto los sistemas de realimentación de admitancias como impedancias son dos métodos distintos de conseguir el mismo objetivo.

También podemos saber que las propiedades de estabilidad y comportamiento son complementarias de tal forma que pueden ser realimentaciones usadas a la vez, produciendo una mejora en el resultado final.

En estos sistemas híbridos el tiempo de las tareas se divide en dos subespacios, el de control de posición y control de fuerza, ya que es imposible realizar las dos medidas de forma precisa a la vez.

Capítulo 4

Hardware

4.1. Arquitectura Hardware

Para tener una idea global de la arquitectura hardware que se utiliza disponemos de la Figura 4.1.

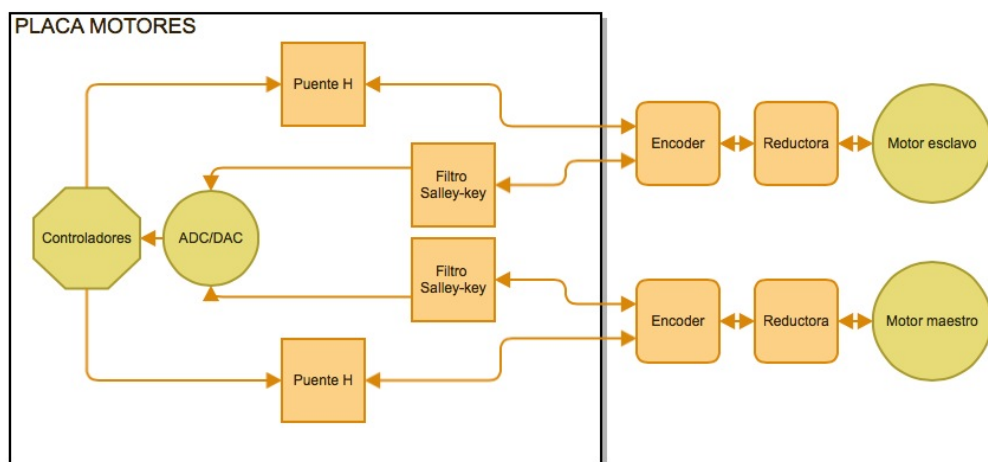


Figura 4.1: Diagrama de bloques de la arquitectura hardware.

Se puede ver un diagrama de bloques simplificado en los elementos importantes del sistema háptico, no quiere decir que sean los únicos, pero sí los más representativos e importantes.

4.1.1. Placa de Motores

Para el desarrollo del proyecto, se ha seleccionado una placa de desarrollo (ver Figura 4.2) cedida por la empresa RBZ Robot Design.

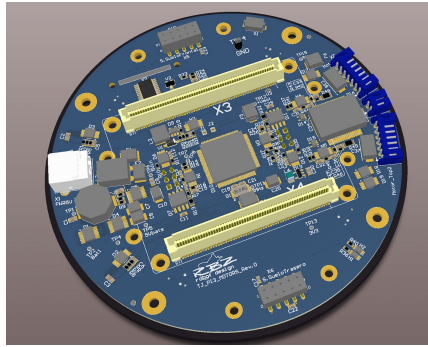


Figura 4.2: Fotografía de la tarjeta cedida por RBZ Robot Design.

- **Puentes H:**

Para empezar vamos a explicar de forma muy esquemática el funcionamiento de un puente H. Básicamente es un circuito que sirve para el control del sentido de giro de un motor eléctrico DC, este circuito puede estar formado por interruptores o por transistores. El puente H básico consta de 4 de estos elementos [Wiki, b].

El término H proviene de la forma más típica de representación gráfica. Para una mejor comprensión nos apoyaremos en la Figura 4.3.

Como podemos ver en la figura existen diferentes posiciones dependiendo de los interruptores que estén activos. Si están S1 y S4 cerrándose se aplica una tensión positiva en el motor. De forma análoga si S2 y S3 están cerrados se le ejerce una tensión negativa al motor y por tanto el motor gira de forma contraria a como lo hacía antes. Existen otras dos posiciones que también son útiles, son aquellas en las que todos los interruptores están en abierto, entonces el motor se frena bajo su inercia, y lo que se conoce como parada activa, en esta posición

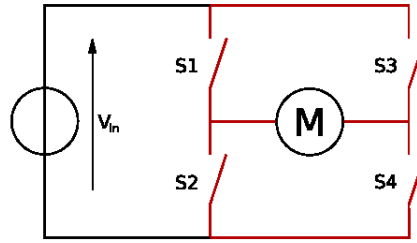


Figura 4.3: Figura de un puente H esquemático

solo tenemos S1 y S3 cerradas.

En la tabla 4.1 tenemos un resumen de todas estas posiciones.

S1	S2	S3	S4	Resultado
1	0	0	1	El motor “avanza”
0	1	1	0	El motor “retrocede”
0	0	0	0	El motor esta bajo el efecto de su inercia
1	0	1	0	El motor esta en “parada activa”

Tabla 4.1: Posiciones de puente H

• Filtros Sallen-Key

Para la lectura del voltaje de los motores disponemos de filtros Sallen-Key como los que podemos apreciar en la figura 4.4. [Wiki, a]

Para el análisis del filtro dividiremos en dos etapas cada uno de los amplificadores, la Ecuación de transferencia de la primera etapa es 4.1.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{R_{24}R_{26} + \frac{-C_{27}C_{24}w^2}{jwC_{27}} - \frac{1}{C_{27}C_{24}w^2}} \quad (4.1)$$

Las ecuaciones de la segunda etapa son las siguientes:

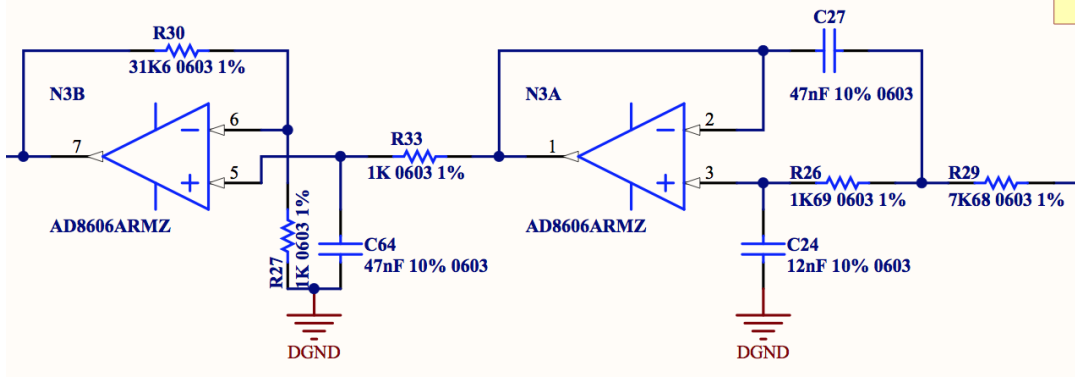


Figura 4.4: Figura del esquemático del filtro Sallen-Key

$$\frac{V_i - V_{aux}}{R_{33}} = V_{aux} j\omega C_{64} \rightarrow V_i = V_{aux} (j\omega C_1 R_1 + 1) \quad (4.2)$$

$$\frac{-V_{aux}}{R_{27}} = \frac{V_{aux} - V_o}{R_{30}} \rightarrow V_o = V_{aux} \frac{R_{27} + R_{30}}{R_{27}} \quad (4.3)$$

Si ahora unimos las Ecuaciones 4.2 y 4.3 podemos obtener la ecuación de transferencia de esta segunda etapa.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_{30} + R_{27}}{R_{20} (j\omega C_{64} R_{33} + 1)} \quad (4.4)$$

Ahora operando las Ecuaciones ?? y 4.4 obtenemos la ecuación de nuestras dos etapas.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-\frac{R_{30} + R_{27}}{C_{27} C_{24} \omega^2}}{R_{20} (j\omega C_{64} R_{33} + 1) \left(R_{24} R_{26} + \frac{R_{24} + R_{26}}{j\omega C_{27}} - \frac{1}{C_{27} C_{24} \omega^2} \right)} \quad (4.5)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_{30} + R_{27}}{R_{20}} \left(\frac{1}{s C_{64} R_{33} + 1} \right) \left(\frac{1}{s^2 C_{27} C_{24} R_{26} R_{29} + s (R_{26} + R_{29}) C_{24} + 1} \right) \quad (4.6)$$

De esta ecuación se entiende a simple vista que se trata de un filtro paso bajo.

También podemos calcular la ganancia sustituyendo los valores de la Figura 4.3 que será $G = 31,6$. Esto será importante mas adelante para conocer cómo leemos la corriente. Y la usaremos en la Ecuación 5.1.

• ADC/DAC

En nuestro microcontrolador encontramos tres ADC y dos DAC, los cuales son básicos para poder leer la corriente del dispositivo. Se trata de un ADC de 12 bits y por tanto con un fondo de escala de $2^{12} - 1 = 4095$. Esto también será importante para nuestro sistema. Según las especificaciones cada uno de los tres ADC puede estar en modo escaneo automático de siete canales a la vez. En nuestro caso escanean las salidas de voltaje de los filtros Sallen-keys que posteriormente transformaremos a corriente apollandonos en el software.

4.1.2. Motores DC

En esta sección vamos a caracterizar el motor DC, sacando las especificaciones de las hojas de características del motor que tenemos en la Tabla 4.2.

Parámetro	Valor	Unidades
U_N	12	V
R_m	2,23	Ω
L_m	$2,64 * 10^{-4}$	H
J_m	$4,16 * 10^{-6}$	kgm^2
t_m	0,0157	s
k_b	0,0243	V s/rad
k_m	0,0243	Nm/A

Tabla 4.2: Parámetros del motor DC

Con esta información gracias a la relación de la ecuación 4.7 obtenemos la

constante eléctrica del motor.

$$t_e = \frac{L_m}{R_m} = 1,184 * 10^{-4} s \quad (4.7)$$

Una vez que tenemos el valor de la constante eléctrica calculamos otro valor necesario para calcular los polos (4.10). El calculo de la constante de fricción viscosa se hace de la siguiente manera.

$$B_m = \frac{J_m}{t_m} - \frac{k_b k_m}{R_m} = \frac{4,16 * 10^{-6}}{0,0157} - \frac{0,0243^2}{2,23} = 2,85 * 10^{-6} \quad (4.8)$$

Una vez llegados a este punto calculamos los polos con la Ecuación 4.10. En ella sustituimos todos los valores que son conocidos salvo el t'_m que es calculado según la Ecuación 4.9.

$$t'_m = \frac{J_m}{B_m} \quad (4.9)$$

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t'_m}\right) \pm \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{t_e} - \frac{1}{t'_m}\right)^2 - 4\frac{k_m k_b}{J_m L_m}} \quad (4.10)$$

Podemos hacer dos aproximaciones para obtener la función de transferencia.

- **Método de eliminación de la constante eléctrica**

Esta aproximación se basa en que la constante mecánica del motor es mucho mayor que la constante eléctrica ($t_e \ll t_m$). Esto hace que despreciemos el efecto inductivo del rotor, y por eso la función de transferencia es la indicada en la Ecuación ??.

$$G_{\dot{\theta}_m}(s) = \frac{\dot{\theta}_m(s)}{U_m(s)} = \frac{k_m}{R_m J_m s + R_m B_m + k_b k_m} \quad (4.11)$$

Si operamos descubrimos:

$$G_{\dot{\theta}_m}(s) = \frac{\dot{\theta}_m(s)}{U_m(s)} = \frac{\frac{k_m}{R_m J_m}}{s + \frac{R_m B_m + k_b k_m}{R_m J_m}} \quad (4.12)$$

Por lo que nuestro polo es:

$$p = -\frac{R_m B_m + k_b k_m}{R_m J_m} = -63,69 \quad (4.13)$$

Calculamos ahora la ganancia:

$$\frac{K}{p} = \frac{k_m}{R_m B_m + k_b k_m} \rightarrow K = 2632,092 \quad (4.14)$$

Con todo esto nuestro modelo es:

$$G_{\dot{\theta}_m}(s) = \frac{2632,092}{s + 63,69} \rightarrow G_{\theta_m}(s) = \frac{2632,092}{s(s + 63,69)} \quad (4.15)$$

• Método de eliminación del polo dominante

Una forma de expresar la función de transferencia del motor de forma genérica es la siguiente

$$G_{\dot{\theta}_m}(s) = \frac{\dot{\theta}_m(s)}{U_m(s)} = \frac{k'_m}{(s + |p_1|)(s + |p_2|)} \quad (4.16)$$

y el valor de k'_m es el representado en la Ecuación 4.17

$$k'_m = \frac{k_m}{J_m L_m} \quad (4.17)$$

Los polos ya los hemos obtenido antes gracias a la Ecuación 4.10 y los valores son una vez resuelta la ecuación:

$$p_1 = -64,18398 \quad (4.18)$$

$$p_2 = -8382,52014 \quad (4.19)$$

Como vemos claramente tenemos un polo dominante, por ello podemos simplificar la expresión

$$G_{\dot{\theta}_m}(s) = \frac{\dot{\theta}_m(s)}{U_m(s)} = \frac{k'_m}{(s + |p_2|)} \quad (4.20)$$

Una vez llegados a este punto debemos asegurar que la ganancia sea constante a frecuencias bajas, así que tenemos:

$$\frac{K_m}{|p_2|} = \frac{k'_m}{|p_1||p_2|} \quad (4.21)$$

Despejando e incluyendo la igualdad 4.17 tenemos que $K_m = 2681,46$

Y por tanto obtenemos un segundo modelo.

$$G_{\dot{\theta}_m}(s) = \frac{2681,46}{s + 64,18398} \rightarrow G_{\theta_m}(s) = \frac{2681,46}{s(s + 64,18398)} \quad (4.22)$$

4.1.3. Encoder Óptico

El encoder que se utiliza en el dispositivo háptico es el HEDS 5540 A. El encoder es el representado en la Figura 4.5. Este encoder tiene 500 pulsos por vuelta. Lo que nos da una resolución de $0,18^\circ$.

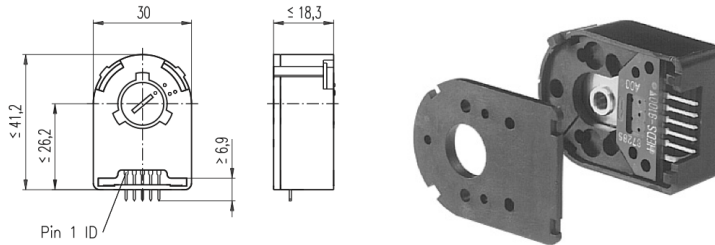


Figura 4.5: Esquemático e imagen del encoder HEDS 5540

El funcionamiento del encoder se basa en el principio óptico de la horquilla fotoeléctrica, un LED envía luz a través de la fina retícula de un disco encargado de generar pulsos. Este pulso está fijado en el eje del motor. Un fototransistor, que es el receptor, transforma en impulsos eléctricos los impulsos luminosos que recibe. Estos impulsos ya pueden ser amplificados y procesados por la electrónica adecuada.

Podemos ver un esquema en la Figura 4.6. Este tipo de encoder tiene mucha más precisión que otros tipos de encoder. Como pueden ser los magnéticos, en los cuales un imán se coloca en el eje y con el movimiento del motor se producen modificaciones magnéticas que son registradas y dan la información. O los encoders inductivos, en los cuales se induce un campo alternante de alta frecuencia que se modula en función del ángulo.

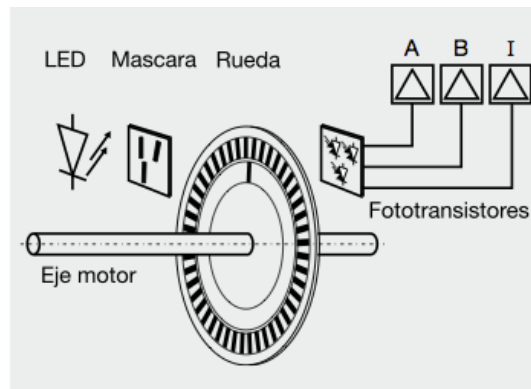


Figura 4.6: Esquemático del funcionamiento de un encoder óptico

Los pines de salida del encoder son los que dan toda la información. En la Tabla 4.3 tenemos la descripción de sus pines. Los pines de GND y V_{CC} son de entrada, y los conectamos a tierra y al voltaje de referencia. En cambio los Canales A, B e I son pines de salida. Un ejemplo de salida de estos pines es la indicada en la 4.7. Como se aprecia las salidas son señales de onda cuadrada, cuyos pulsos se cuentan para determinar la posición exacta o determinar la velocidad de giro. El desfase entre las señales de los canales A y B permite que podamos comprobarlos y así saber si el sentido de giro es horario, o antihorario. El canal Index (Canal I) puede ser usado como referencia para determinar con precisión el ángulo de rotación. [Maxon]

Pin del encoder	Descripción
Pin 1	GND
Pin 2	Canal I
Pin 3	Canal A
Pin 4	V_{CC}
Pin 5	Canal B

Tabla 4.3: Pines encoder

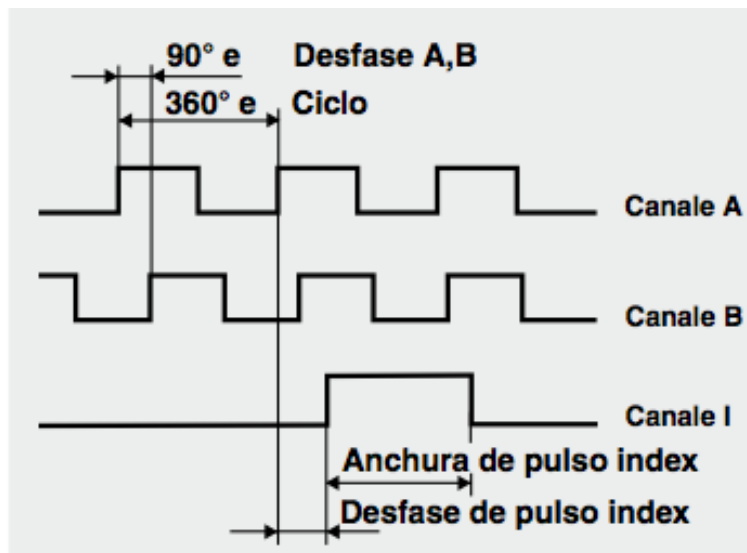


Figura 4.7: Esquemático e imagen del encoder HEDS 5540

4.1.4. Reductora

Una reductora no es más que un conjunto de engranajes que consiguen reducir la velocidad y aumentar el par de fuerza. Se ha utilizado el modelo Planetary Gearhead GP 32 A número 166161 con una relación de reducción de 576/25.

Un tren de engranajes epicicloidal consta de dos engranajes montados de manera que el centro de uno de los engranajes gira alrededor del centro del otro. Un brazo conecta los centros de los dos engranajes y gira para llevar a un engranaje, llamado el “engranaje planetario”, alrededor del otro, llamado el “engranaje solar”. Los

“engranajes planetarios” y el “engranaje solar” están perfectamente acoplados para evitar el deslizamiento. Un punto en el círculo del “engranaje planetario” traza una curva epicicloide. Ver Figura 4.8. Un tren de engranajes epicicloidial se puede montar de modo que los “engranajes planetarios” se sitúen en el interior del círculo primitivo del engranaje solar, un engranaje anular. En este caso, la curva trazada por un punto del “engranaje planetario” es un hipocicloide. Ver Figura 4.9

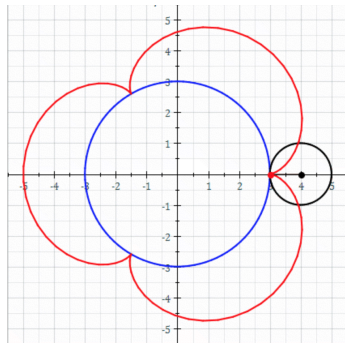


Figura 4.8: Curva epicicloide.

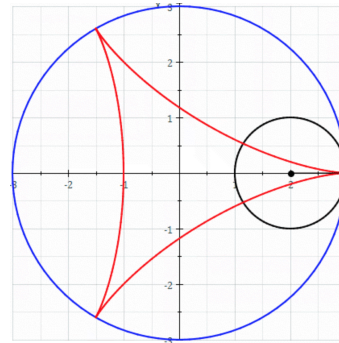


Figura 4.9: Curva hipocicloide.

La combinación de trenes de engranajes epicicloidales, en los que unimos engranajes planetarios con un engranaje angular se denomina tren de engranajes planetario. Esta es la formación de nuestra reductora, como podemos ver en la Figura 4.10. [Paul, 1979]

Como vemos en la Figura 4.10 existe el engranaje central, “engranaje solar” y como podemos deducir de su nombre, al igual que el sol, no se mueve. La energía se transmite a través de los brazos que son los que giran alrededor del sol, por seguir con la analogía el punto donde están anclados los engranajes planetarios son las órbitas circulares al rededor del sol. Estas giran y hacen que el engranaje exterior gire también, aunque lo hace con un par de fuerza mayor y menor velocidad. En cuanto al sentido de giro la transmisión del giro no varía, es decir si la entrada gira en sentido horario o anti-horario, la salida también lo hará igual.

Tras lo dicho en estas dos últimas Secciones 4.1.3 y 4.1.4 se sabe que el encoder es

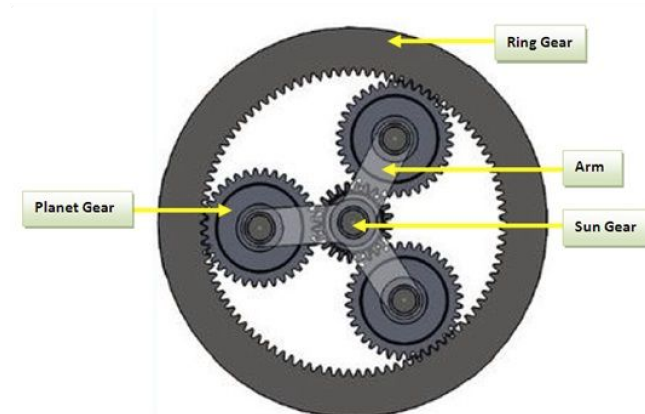


Figura 4.10: Esquema de una reductora genérica.

de 500 pulsos por vuelta y que la reductora tiene una relación de reducción de 576/25 y por ello gracias a la Ecuación 4.23 podemos averiguar la resolución de nuestro movimiento.

$$Resolucion = \frac{360^\circ}{Puls_{encoder} * Rela_{reduct}} = \frac{360^\circ}{500 * \frac{576}{25}} = \frac{1}{32} = 31,25 * 10^{-3} \quad (4.23)$$

Por lo tanto nuestra resolución es de $31,25 * 10^{-3}$

Capítulo 5

Software

5.1. Arquitectura software

En la Figura 5.1 vemos un esquema de bloques de la arquitectura básica de nuestro software.

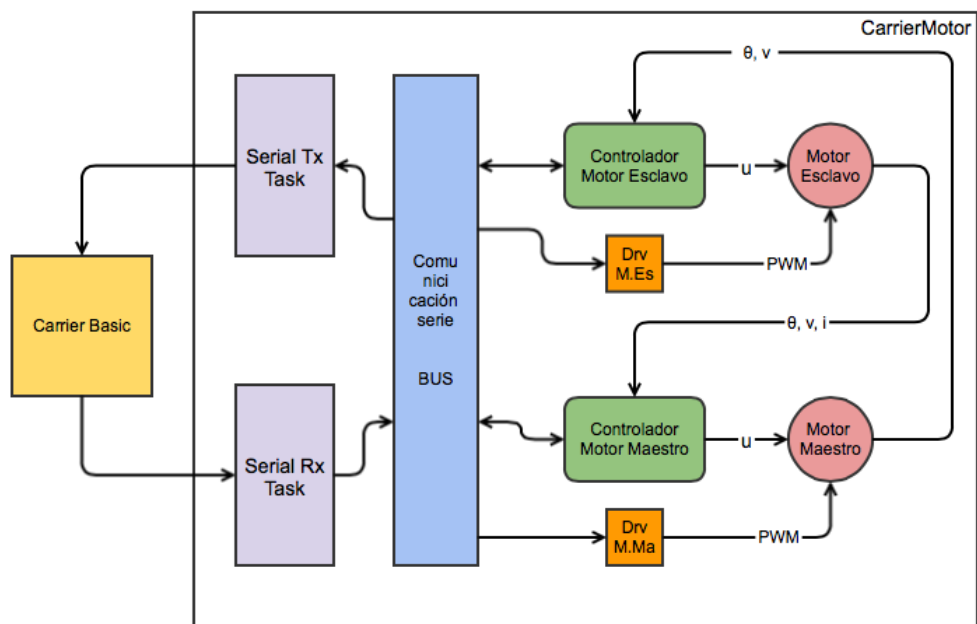


Figura 5.1: Diagrama de bloques de la arquitectura software.

Podemos observar en este diagrama varias cosas. Vemos los dos motores, el esclavo

y el maestro. El motor maestro tiene sus drivers, los cuales le permiten moverse gracias al PWM. El controlador del motor esclavo lee desde el motor maestro su posición y velocidad, y la dirige al motor esclavo la posición del motor maestro. De esta manera el motor esclavo sigue al maestro. El motor maestro es movido por su propio controlador. Este toma los datos del motor esclavo y procesando la corriente y la posición de este motor realizamos la realimentación en el motor maestro. Tanto los controladores como los drivers reciben la información por la comunicación serie. Existen también dos tareas que son las que reciben y transmiten a la aplicación carrierBasic.

5.2. Temporización de tareas

La temporización de tareas se ha llevado a cabo con un sistema en tiempo real conocido como FreeRTOS ¹. Como su propio nombre indica, FreeRTOS, significa gratis (free), y RTOS es el acrónimo del inglés, real-time operating system. Continuando con el sistema que hemos utilizado, diremos que *FreeRTOS™* es el líder en el mercado del sistema operativo en tiempo real (RTOS). Es capaz de soportar 34 arquitecturas diferentes y recibe 107.000 descargas al año. Se desarrolla profesionalmente, la calidad es estrictamente controlada, es robusto y de uso gratuito en productos comerciales, sin exigir como requisito para su uso el exponer su código fuente al usuario de FreeRTOS. Se utiliza en todos los sectores de mercado imaginables, desde juguetes a la navegación aérea.



Figura 5.2: Logo de FreeRTOS.

La mayoría de los sistemas operativos parecen permitir que varios programas se

¹<http://www.freertos.org>

ejecuten al mismo tiempo. Esto se conoce como multitarea. En realidad, cada núcleo del procesador sólo puede ejecutar un solo hilo de ejecución en cualquier punto dado en el tiempo. Una parte del sistema operativo llamado el planificador es responsable de decidir cuando se ejecuta cada programa, y proporciona la ilusión de la ejecución simultánea por la rápida conmutación entre cada programa. El tipo de un sistema operativo se define por la forma en que el planificador decide qué programa se ejecute cuando. Por ejemplo, el planificador utilizado en un sistema operativo multi-usuario (tal como Unix) se asegurará de cada usuario obtiene una buena cantidad de tiempo de procesamiento. Otro ejemplo, el planificador en un sistema operativo de escritorio (como Windows) tratará de asegurar que el equipo siga respondiendo a su usuario².

El planificador en un sistema operativo en tiempo real (RTOS) está diseñado para proporcionar un patrón de ejecución predecible. Esto es particularmente interesante para los sistemas integrados como sistemas embebidos que a menudo tienen requisitos de tiempo real. A los requisitos en tiempo real que se especifica que el sistema integrado debe responder a un determinado evento dentro de un tiempo estrictamente definido (el plazo). Una garantía para cumplir con los requisitos de tiempo real sólo se puede realizar si el comportamiento del planificador del sistema operativo se puede predecir (y por lo tanto es determinista).

Los planificadores tradicionales en tiempo real, como el programador utiliza en FreeRTOS, persiguen el determinismo, permitiendo al usuario asignar una prioridad a cada ebra de ejecución. El planificador utiliza entonces la prioridad de cada ebra de ejecución para ejecutar la próxima. En FreeRTOS, un ebra de ejecución se llama una tarea.

Como podemos observar en la fig 5.3³ esos serían los cuatro estados básicos donde se puede encontrar cualquiera de nuestras tareas una vez creada:

- Lista: una tarea está lista cuando sólo espera a que el planificador le dé acceso

²FreeRTOS no es un gran sistema operativo, ni está diseñado para ejecutarse en un procesador de la clase de computación de escritorio, utilizo estos ejemplos sólo porque se trata de sistemas con los cuales estamos más familiarizados

³<http://senstools.gforge.inria.fr/doku.php?id=os:freertos>

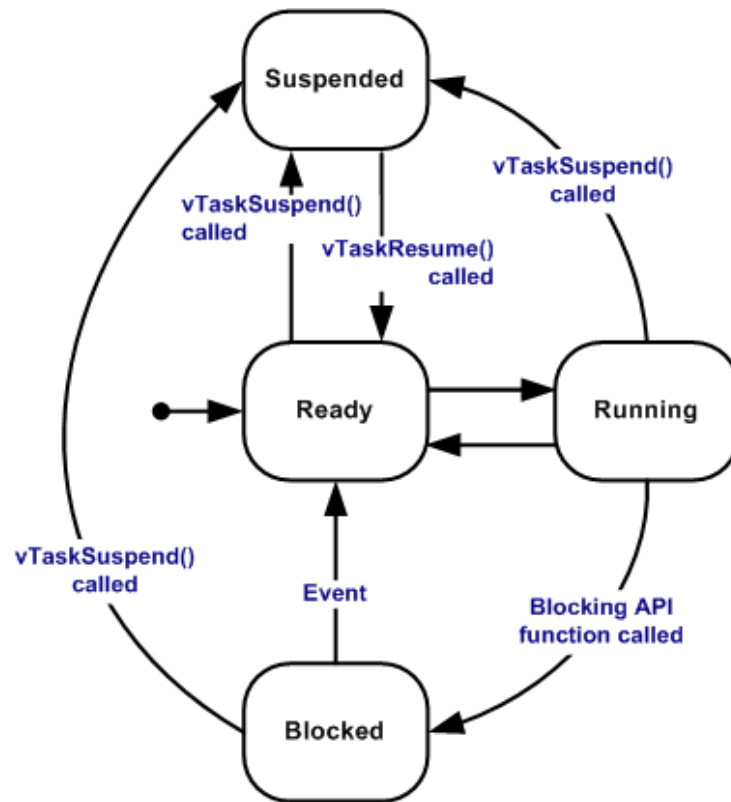


Figura 5.3: Exquema de estados de una tarea en FreeRTOS.

a la CPU, lo que significa que otra tarea con el mismo o más alto nivel de prioridad se está ejecutando.

- Corriendo: una tarea que se está ejecutando.
- Bloqueado: una tarea que espera un evento antes de continuar su ejecución. Los eventos pueden ser temporales (retrasos) o externos (intervención del usuario).
- Suspensión: una tarea que ha sido retirada del planificador. No se ejecutará hasta que se vuelva a colocar al estado Lista.

Una vez que nuestra tarea ha sido creada está “lista”, puede pasar a ocupar el espacio del microprocesador y por tanto a estar en el estado “corriendo” desde este estado existen tres posibilidades. La primera y más lógica es que su tiempo de

procesamiento asignado acabe por lo que volvería al estado de “lista” esperando el otro slot de tiempo cuando le corresponda según el planificador. La segunda opción es que esta tarea se “suspenda” por cualquier razón como por ejemplo tener algún atributo que produce cualquier otra tarea, o porque otra tarea usa un espacio de memoria compartido. Y por último que se bloquee por una llamada de un API, y pase a estar “bloqueada”. Si esta bloqueada puede pasar a estar otra vez “lista” o “suspendida”. Y si está suspendida sólo puede volver al estado “lista”. Con esta idea en la cabeza podemos entender de una forma mucho más clara la idea de la temporización.

Nuestro sistema está definido de la siguiente manera, cada controlador es una hebra diferente, una tarea tal y como se define en FreeRTOS. De esta manera tenemos: motor 3, motor 4, transmisión serie, recepción serie.

- Motor 3. El motor esclavo.
- Motor 4. El motor maestro. En el cual recibimos la sensación de realimentación.
- Transmisión serie: esta tarea es la encargada de enviar en todo momento los datos que recogemos de los valores del motor como la corriente o la posición.
- Recepción serie: esta tarea se dedica a recibir información que proviene de la placa de linux, en ella se indica lo que queremos ejecutar gracias a una trama que explicaremos a continuación (5.4).

5.3. Comunicación serie

stx 8bits	type 8 bits	funct 8 bits	motor 8 bits	Data1 32 bits	Data2 32 bits	Data3 32 bits	crc 8 bits	etx 8 bits
----------------------------	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Figura 5.4: Trama de comunicación serie.

La figura que mostramos arriba representa la trama de comunicación serie entre

las dos placas, la de motores y la de linux. En ella podemos ver 18 bytes, algunos de ellos de control como son el stx, etx o crc. El resto de los bytes son de información propiamente dicha. Pasamos a desglosarlos de forma más detallada a continuación:

- **type:** estos 8 bits nos indican si queremos lanzar algún método que implique a los motores, a los controladores, a la comunicación o resetear la placa de motores, para lo cual deshabilitamos el PWM de todos y cada uno de los motores y reinicializamos los valores de los controladores.
- **funct:** este byte nos indica la función que tenemos que ejecutar, dentro del tipo que son, las funciones que utilizamos aquí usan también los datos1, datos2 o datos3 dependiendo de lo que necesiten. También se referencian el número de motor que utilizamos, de forma que también usamos esa información como parte de los parámetros que introducimos en los métodos.
- **motor:** como hemos dicho en el punto anterior es otro byte que nos dice el número del motor al que nos estamos refiriendo cuando esto sea necesario ya que no siempre lo es y muchas veces es un byte muerto el cual ni siquiera leemos.
- **Data1, Data2, Data3:** como el caso anterior simplemente es información necesaria para nuestros parámetros.

5.4. Controladores

5.4.1. Controlador maestro

El controlador maestro es la pieza angular de nuestro dispositivo háptico, ya que el es el encargado de realizar la tarea de realimentación de fuerzas por corriente.

Comenzamos relacionando la corriente máxima que genera el motor y leemos del ADC. Para ello nos hemos ayudado de la Ecuación 5.1. En ella vemos el voltaje de referencia V_{ref} , la ganancia y la resistencia del filtro Sallen-Key.

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{G * R_{sallenkey}} = \frac{3,3v}{31,6 * 0,05\Omega} = 2,088A \quad (5.1)$$

Sabiendo que $I_{max} = 2,088A$ ahora reconstruimos la señal que obtenemos del ADC. Sabemos como ya hemos comentado antes que el ADC es de 12 bit y por tanto tiene 2^{12} códigos y $2^{12} - 1$ umbrales. Con esto y de la Ecuación 5.2 se desprende la resolución.

$$Resolucion = \frac{\frac{V_{ref}}{G * R_{sallenkey}}}{Fondodeescala} = \frac{3,3v}{\frac{31,6 * 0,05\Omega}{2095}} = 0,510mA \quad (5.2)$$

De esta última ecuación se desprende el calculo de la corriente que lee el ADC en cada momento. Multiplicamos el valor de la resolución por el código que indica dicha lectura, tal y como indica la Ecuación 5.3. Con esta resolución, teóricamente se obtiene que el error de cuantificación es $0,255mA$ justo la mitad de la resolución.

$$I_{motor} = Code_{ADC} * Resolucion = Code_{ADC} * 0,510mA \quad (5.3)$$

Una vez en este punto, del mismo controlador se han realizado cuatro aproximaciones, para ver el comportamiento de cada una de ella. son las expuestas a continuación:

- **Aproximación lineal**

La relación entre la corriente leída y el voltaje con el que se pueden excitar los motores es la mostrada en la Figura 5.5. Esta se desprende de resolver una realción lineal entre la corriente de salida del motor esclavo y el voltaje de entrada del motor maestro. El cálculo de la pendiente se muestra en la Función 5.4

$$Pendiente = \frac{V_{max}}{I_{max}} = \frac{12v}{2,088A} = 5,7471\Omega^{-1} \quad (5.4)$$

Como se deduce de todo lo anterior, ya se ha generado un sistema háptico realimentado por fuerza (corriente). La inclusión de esta relación en el sistema hace que aparezcan problemas, el principal no es otro que la aparición de realimentación sin necesidad de ejercer ninguna fuerza en el motor esclavo. El simple hecho de que el motor esclavo siga el movimiento del motor maestro

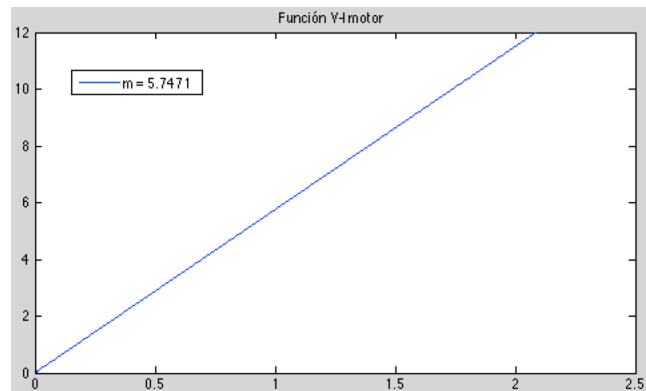


Figura 5.5: Funcion V-I.

genera una corriente de salida que crea una realimentación. Por ello tras un estudio pragmático, para “bajas frecuencias”, se define un umbral a partir del cual se realiza la realimentación. La nueva línea es la representada en la Figura 5.6. Su Ecuación es 5.5 con una pendiente de 6,0362 y una ordenada en el origen con valor $-0,017$.

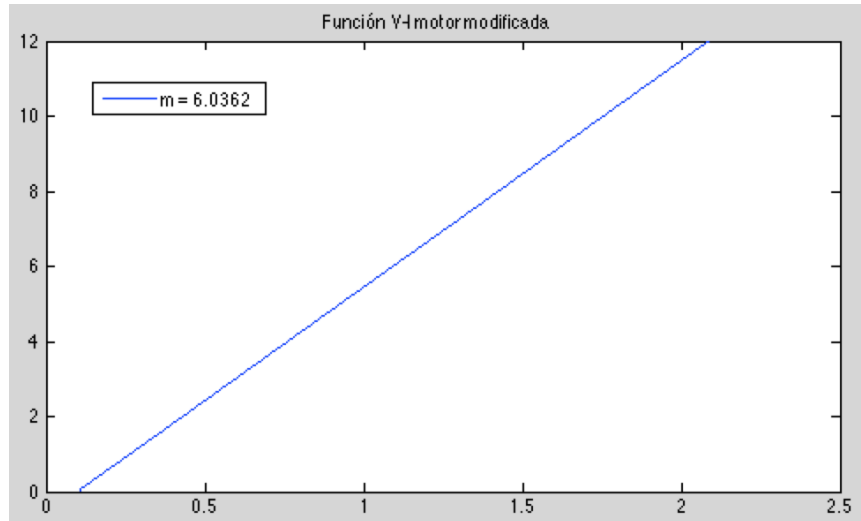


Figura 5.6: Funcion V-I modificada.

$$V = 6,0362 * I - 0,6036 \quad (5.5)$$

Una vez que se introduce esta aproximación más compleja aparece otro problema grave. Debido al umbral el motor maestro entra y sale del estado de realimentación de forma muy brusca. Y el punto de entrada y salida es el mismo. Aparece una sensación molesta para el usuario y que hace imposible que el dispositivo háptico sea funcional. Por ello se recurre a crear un “Smith Trigger” con ayuda del software.

Como se puede ver en la figura 5.7, la que representa una función de transferencia de un Smith Trigger genérico, se trata de un recurso para dar dos valores a una función que sube y baja, uno cuando alcanza un valor en la subida y otro cuando alcanza otro valor en la bajada. Así se hace en este caso. Los valores para este caso serían los mostrados en la Tabla 5.1.

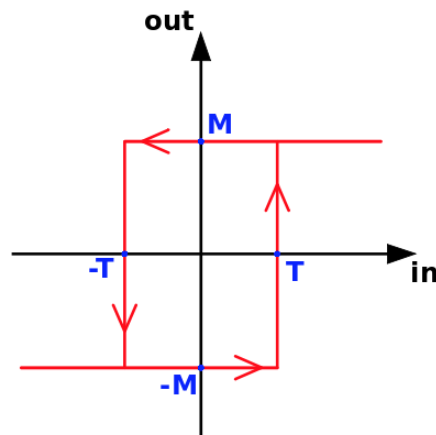


Figura 5.7: Funcion general de una función smith trigger.

En este caso específico la dos funciones M y -M son exactamente iguales es un caso un tanto extraño, pero consigue evitar la sensación de la que hablabamos anteriromente.

Para la programación de este controlador se ha optado por la creación de dos

Parametro	Valor	Unidades
-T	0,1	A
T	0,02	A
M	$V = 6,0362 * I - 0,017$	V
-M	$V = 6,0362 * I - 0,017$	V

Tabla 5.1: Valores del “Smith Trigger”

estados:

- Con realimentación
- Sin realimentación

La Figura 5.8 representa el diagrama de bloques de la programación del controlador maestro de una forma esquemática y fácil de comprender.

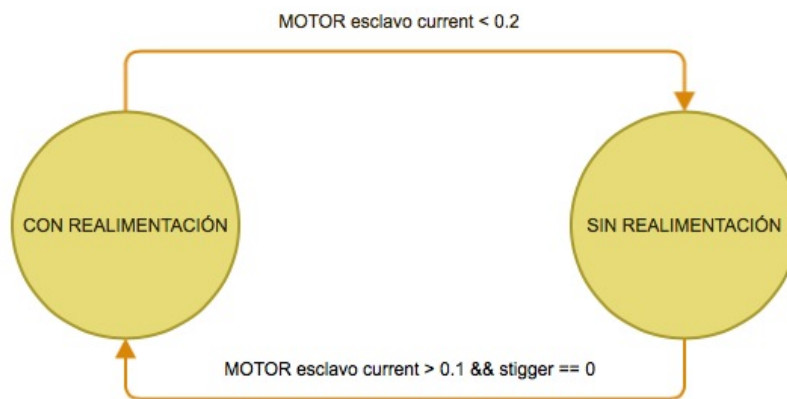


Figura 5.8: Diagrama de bloques de la programación del controlador maestro.

El estado con realimentación se refiere al estado en el cual transformamos la corriente que llega del motor esclavo en diferencia de potencial para excitar el motor maestro. Y el estado sin realimentación es en el cual inyectamos un voltaje de 0,0 voltios y por tanto lo dejamos en alta impedancia. Este estado

del motor esta detalladamente explicado en el apartado Puentes H del Capítulo 4.

Para saltar de un estado a otro se han de cumplir las condiciones que se representan en la Figura 5.8. Si se encuentra en el inicial, no tendrá realimentación, por tanto hasta que no se supere una corriente de 0,1 amperios en el motor esclavo, se mantendrá en ese estado de alta impedancia. Una vez superados si estamos en ese estado de no realimetación saltará al estado con realimentación. Se mantendrá en este estado inyectando los valores de voltaje al motor maestro siguiendo la Ecuación 5.5. Hasta que la corriente del motor esclavo baje de 0,02 voltios. Este control es un control de impedancias por el cual insertamos una fuerza proporcional a la que nos es ejercida por parte del motor esclavo.

Existe otro problema mas trivial de resolver, y es que la lectura de la corriente que se hace en el dispositivo a traves de los ADC es solo positiva, en valor absoluto, por ello existe un control intermedio en posición para determinar la polaridad del voltaje con el que se excita al motor maestro. Este control simplemente testea la evolución de la posición del motor esclavo, para realizar siempre esta realimentación en sentido contrario al movimiento. Por esta razón aparece una nueva Ecuación que es la imagen de la 5.5 respecto al eje de arcisas. La nueva Ecuación es la 5.6.

$$V = -6,0362 * I + 0,6036 \quad (5.6)$$

Una vez testeadó que esta aproximación lineal funciona y reacciona de forma positiva a la fuerza se han propuesto otras aproximaciones parecidas a esta para estudiar su respuesta y su comportamiento.

- **Aproximación exponencial**

La segunda aproximación es una curva exponencial, que responde a la Ecuación 5.7. Y representada en la Figura 5.9.

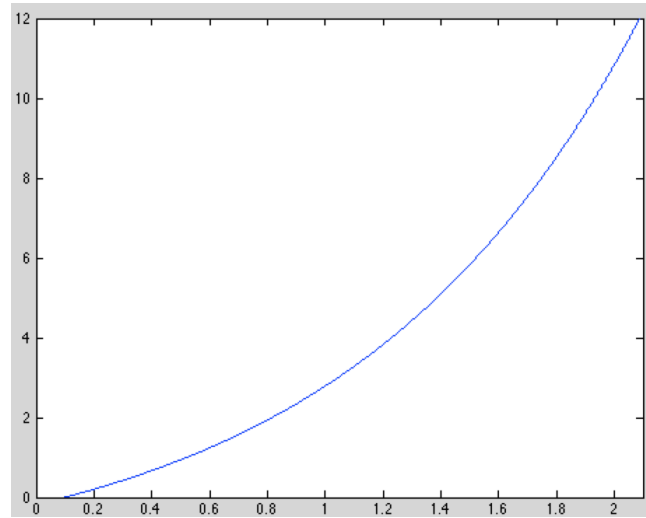


Figura 5.9: Grafica del controlador exponencial.

$$V = 1,7232 * e^I - 1,9045 \quad (5.7)$$

Como se ve claramente en la Figura 5.9 la nueva curva tiene una respuesta muy lenta ante las variaciones más pequeñas de corriente de tal manera que la sensación de realimentación tendría que ser más lenta y por tanto, ante las primeras resistencias deberían de ser menos apreciables para el usuario y con un incremento cada vez mayor. Como comentamos en el anterior punto la ecuación imagen la podemos encontrar en la Ecuación 5.8.

$$V = -1,7232 * e^I + 1,9045 \quad (5.8)$$

- **Aproximación logarítmica**

En la tercera de estas nuevas aproximaciones hemos intentado generar todo lo contrario, se trata de una función logarítmica, su Ecuación es la 5.10 y su representación gráfica la Figura 5.10.

$$V = 9,0928 * \log I - 9,0928 \quad (5.9)$$

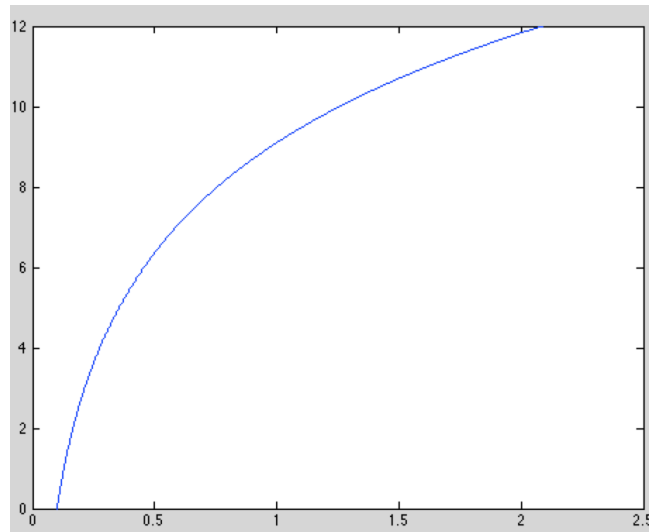


Figura 5.10: Grafica del controlador logaritmico.

Como podemos ver en esta Figura 5.10 pasa exactamente lo contrario que sucedia antes, es una curva con una respuesta muy rápida a las primeras variaciones y por tanto la realimentación será muy brusca, de manera que se sienta de forma brusca. También se destaca que una vez pasado un umbral, el incremento de fuerza realimentada sera casi inaprecible. La Ecuación ?? responde a su función imagen.

$$V = -9,0928 * \log I + 9,0928 \quad (5.10)$$

- **Aproximación polinómica de grado 3**

Por último se propone un caso más extremo a los anteriores de respuesta lenta. Se trata de una función polinómica de grado 3. Podemos ver su variación en la Figura 5.11 que cumple la Ecuación 5.11.

$$V = 1,3201 * I^3 - 1,3201 * 10^{-3} \quad (5.11)$$

Este es un caso más extremo y se intenta ver si una repuesta lenta es apreciada

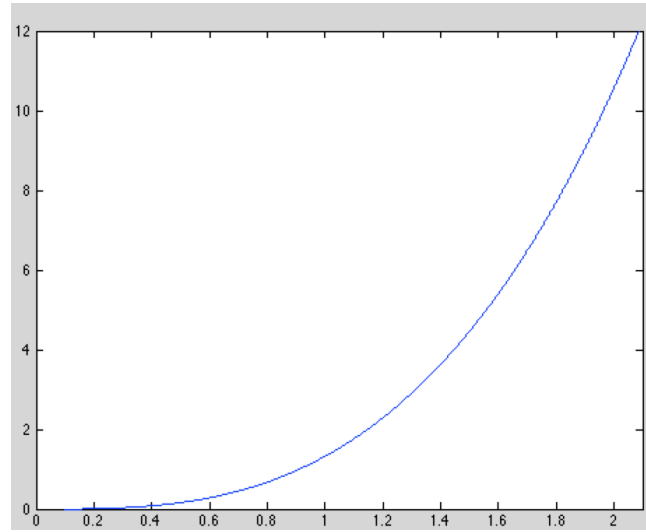


Figura 5.11: Grafica del controlador x^3 .

o casi es despreciable a la sensibilidad humana. Y su Ecuación imagen es 5.12

$$V = -1,3201 * I^3 + 1,3201 * 10^{-3} \quad (5.12)$$

5.4.2. Controlador esclavo

El controlador esclavo es mucho más sencillo. Este controlador se limita a ser como su propio nombre indica un esclavo de su maestro, siempre le sigue allí donde va. El control que se realiza en este caso a diferencia del caso anterior es en posición, de tal forma que estamos tomando la posición del motor maestro, movido por el usuario, y la estamos forzando en el esclavo.

Se ha añadido un valor de error para compensar parte del error mecánico que poseen los motores, (por ejemplo voltajes inferiores a 0,5 voltios no generan ningún movimiento en los motores). Este valor de error se calcula siguiendo la Ecuación 5.13.

$$error = \theta_{mo.maestro} - \theta_{mo.esclavo} \quad (5.13)$$

Una vez obtenido ese error lo sumamos a nuestro valor de posición.

$$\theta'_{mo.esclavo} = \theta_{mo.maestro} - error \quad (5.14)$$

Uniando las Ecuaciones 5.13 y 5.14 nos queda la Ecuación 5.15

$$\theta'_{mo.esclavo} = 2 * \theta_{mo.maestro} - \theta_{mo.esclavo} \quad (5.15)$$

Capítulo 6

Experimentos

En este capítulo se va a entrar en los detalles de cómo se han realizado todos los experimentos y cómo se han ido variando los controladores de manera que se pueda estudiar la diferencia de los sistemas hápticos conseguidos. El capítulo se ha dividido en hitos guardando la cronología del desarrollo.

6.1. Hito 1: Controlador esclavo

Para comenzar lo primero que se implementa es el controlador esclavo, cuya función es que el motor del mismo nombre siga al motor maestro. La primera aproximación es simple, se inyecta la posición del motor maestro al motor esclavo con un resultado alejado del idóneo y que podemos ver en la Figura 6.1. Como se observa el error es bastante grande. La solución a este problema se ha descrito en la sección 5.4.2 y esta implementación hace que el resultado sea mucho más asumible. La Figura 6.2 muestra este resultado.

Entrando en más detalles podemos ver la Figura 6.3 en la cual vemos la diferencia de errores entre una aproximación y otra. Se consigue reducir el error en más de medio radián. Con este resultado, asumiendo el error que existe damos por implementado este controlador.

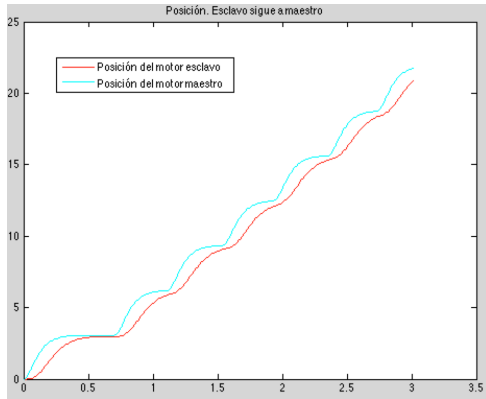


Figura 6.1: Posiciones de los motores siguiéndose.

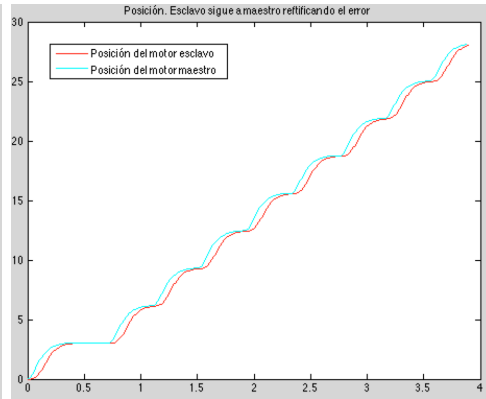


Figura 6.2: Posiciones de los motores siguiéndose incluyendo el error.

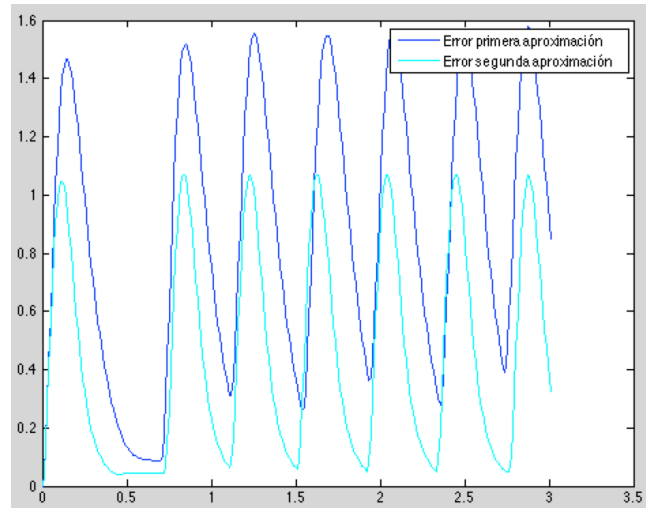


Figura 6.3: Comparativa de los errores

6.2. Hito 2: Impedancia del motor

El primer problema que apareció es la resistencia que ejerce el motor por estar alimentado. El problema teórico y la solución están expuestas en el apartado Puentes H del capítulo 4. Como podemos ver en la imagen 6.4 la corriente que circula por el motor maestro, cuando existe impedancia como cuando no la existe, son la misma, nula.

Apoyandonos en el software la solución a este problema es simple. Lo que se lleva a cabo es forzar ese nivel de alta impedancia que se describe en la teoría. Este nivel de alta impedancia sólo se mantiene así durante el estado de no realimentación explicado en el capítulo anterior y representado en la figura 5.8. De esta forma conseguimos que esa impedancia sea muy baja, casi nula, mientras no exista realimentación.

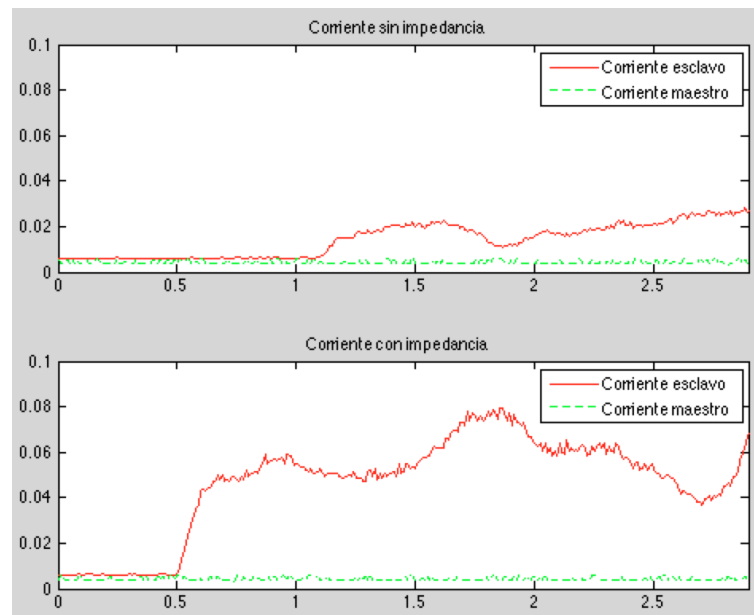


Figura 6.4: Gráficas de corriente con y sin impedancia del motor maestro

Antes de seguir con la explicación de los experimentos, a partir de la inclusión del controlador maestro, siguiendo una lógica en la cual se intenta que todos los experimentos sigan los mismos patrones, se ha de remarcar que estos solo se pueden hacer de forma manual por lo que existen diferencias entre unos y otros, pero sí se logra apreciar las diferencias de una forma clara. Desde este momento hasta el final del capítulo aparecerán diferentes figuras de los experimentos, todas tienen la misma estructura. Esta estructura es la más lógica para que se consiga apreciar lo que se explica. Cada figura posee tres gráficas mostrando de arriba abajo:

- Gráfica de velocidad: vemos en color verde la velocidad del motor maestro y en

rojo la del motor esclavo.

- Gráfica de posición: vemos en color verde la posición del motor maestro y en rojo la del motor esclavo.
- Gráfica de corriente: vemos en color verde la corriente del motor maestro y en rojo la del motor esclavo.

6.3. Hito 3: Controlador maestro. Aproximación Lineal

Tras conseguir hacer que un motor siga a otro se comenzó con la implementación del sistema háptico realimentado propiamente dicho. Este primer controlador es la aproximación lineal que está explicada teóricamente en la sección 5.4.1. Se trata de una primera aproximación, y por tanto lo más sencillo es realizar un aproximación lineal. En las Figuras 6.5 y 6.6 vemos las respuesta de este controlador ante dos experimentos.

La primera Figura, 6.5, responde al siguiente perfil de estudio. El usuario empieza a mover el motor maestro y se comienza a ejercer poco a poco una pequeña resistencia en el motor esclavo, que se incrementa hasta llegar a detener el motor esclavo de una forma más o menos brusca y por consiguiente el usuario del motor maestro siente una fuerza de realimentación tan fuerte que tampoco puede moverse. Si se observa la figura se ve que están representados diversos eventos:

- Como se ve alrededor del segundo 3,5 existe un pequeño pico de corriente que hace que el usuario sienta la realimentación. Se ve claramente en la velocidad que el usuario casi frena su movimiento debido a este primer contacto con la sensación y su velocidad disminuye, como se ve en la gráfica. También se aprecia en la gráfica de posición que existe una disminución de la pendiente.
- Aproximadamente desde el segundo 8 hasta el 10 se incrementa la fuerza ejercida de una forma más drástica hasta que se detiene por completo. Se ve subir tanto la corriente del maestro como del esclavo de una forma que guarda bastante

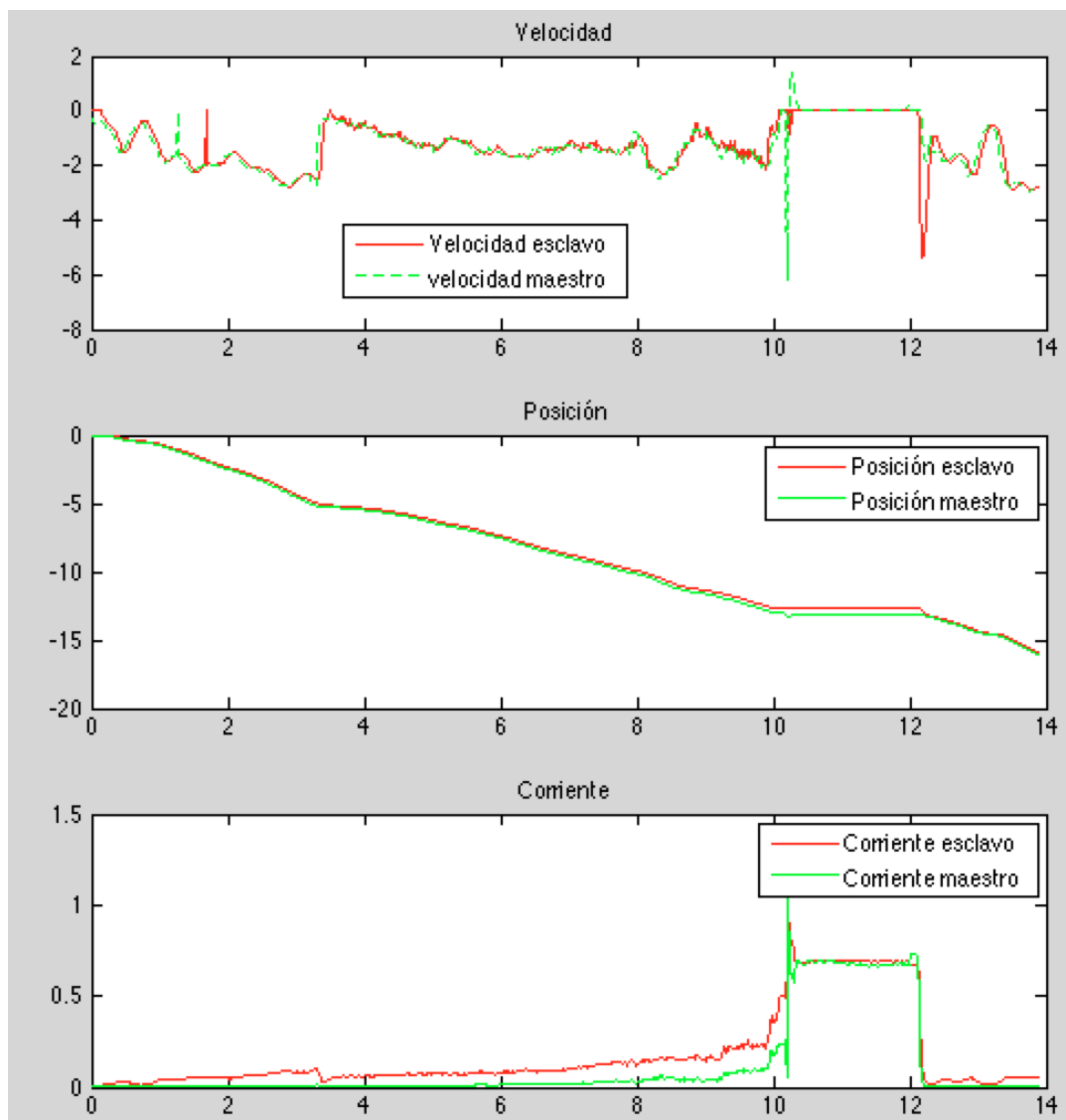


Figura 6.5: Gráfica de respuesta a la aproximación lineal

la linealidad. Respetando la proporción. Se observa en la gráfica de velocidad como llega a 0 y por tanto el usuario es incapaz de mover el motor por la fuerza ejercida en el motor maestro.

- Por último entre los segundos 10 a 12 se aprecia claramente como el usuario no puede mover el motor maestro ya que se encuentra a velocidad 0 y en la misma

posición. Se puede ver claramente la corriente en la ultima gráfica y queda clara que es una fuerza suficiente para imposibilitar el movimiento.

Ahora vamos a observar otro experimento con un perfil algo diferente a este. El motor esclavo inicia el experimento suelto y se ejerce una fuerza muy fuerte de forma subita, después se libera de forma repentina, y se vuelve a ejercer la misma fuerza para después ir soltando el motor esclavo de forma paulatina.

En la Figura 6.6 podemos ver todo este proceso, en los siguientes puntos se analiza de forma más completa la gráfica:

- Sobre el primer medio segundo aparece la gran fuerza inesperada sobre el motor esclavo que hace que la corriente de los dos motores suba de forma precipitada. Como se ve en las otras dos gráficas el movimiento es casi nulo a la par que la velocidad.
- Aproximadamente en el segundo 3 se ve una bajada de forma repentina de la corriente, esto es por lo comentado anteriormente, se libera de fuerza el motor esclavo durante los siguientes segundos el motor esclavo sigue al maestro hasta que en el segundo 8 se vuelve a ejercer esta fuerza sobre el motor esclavo. Todo esto se ve claramente también en las gráficas de posición y velocidad.
- En el segundo 10 se aprecia un reducción gradual hasta el segundo 13, tanto la corriente del motor esclavo como la del maestro descienden de forma lineal uno con el otro.

6.4. Hito 4: Controlador maestro. Aproximación exponencial

Tras la primera aproximación descrita en el apartado anterior, ahora se propone algo diferente y a continuación se muestra otro ejemplo, representado en la Figura 6.7, parecido a los anteriores, para analizar la respuesta de este nuevo caso de estudio y como reacciona el sistema háptico. Este perfil sigue el patrón del anterior, comienza

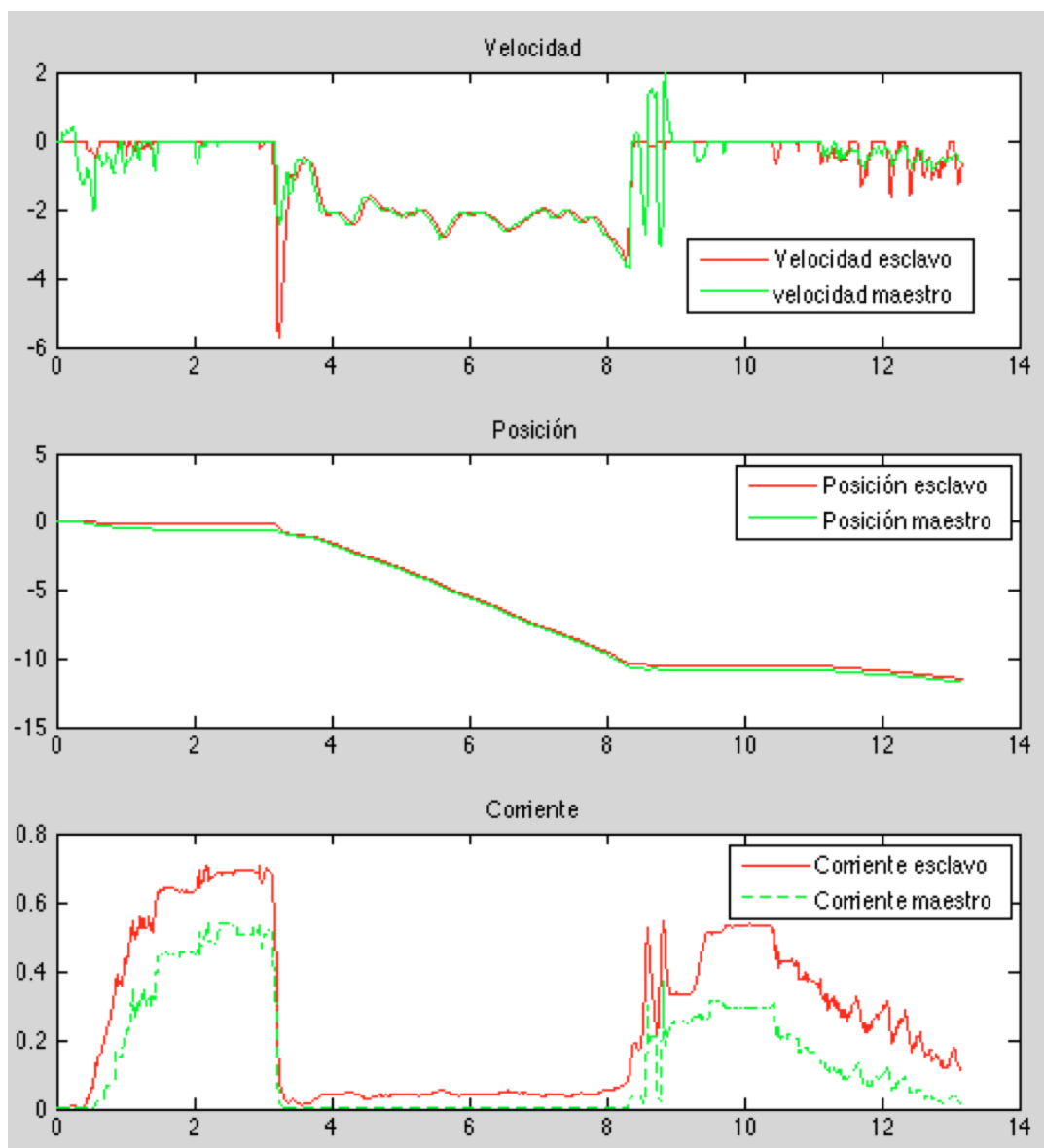


Figura 6.6: Gráfica de respuesta a la aproximación lineal

deteniéndose de forma repentina el motor esclavo(imponiendo mucha fuerza sobre él), y de la misma forma lo deja libre y pasado un tiempo en el que se mueve sin realimentación se vuelve a ejercer la misma fuerza y se va liberando de forma gradual. Se analiza la 6.7 y se puede apreciar:

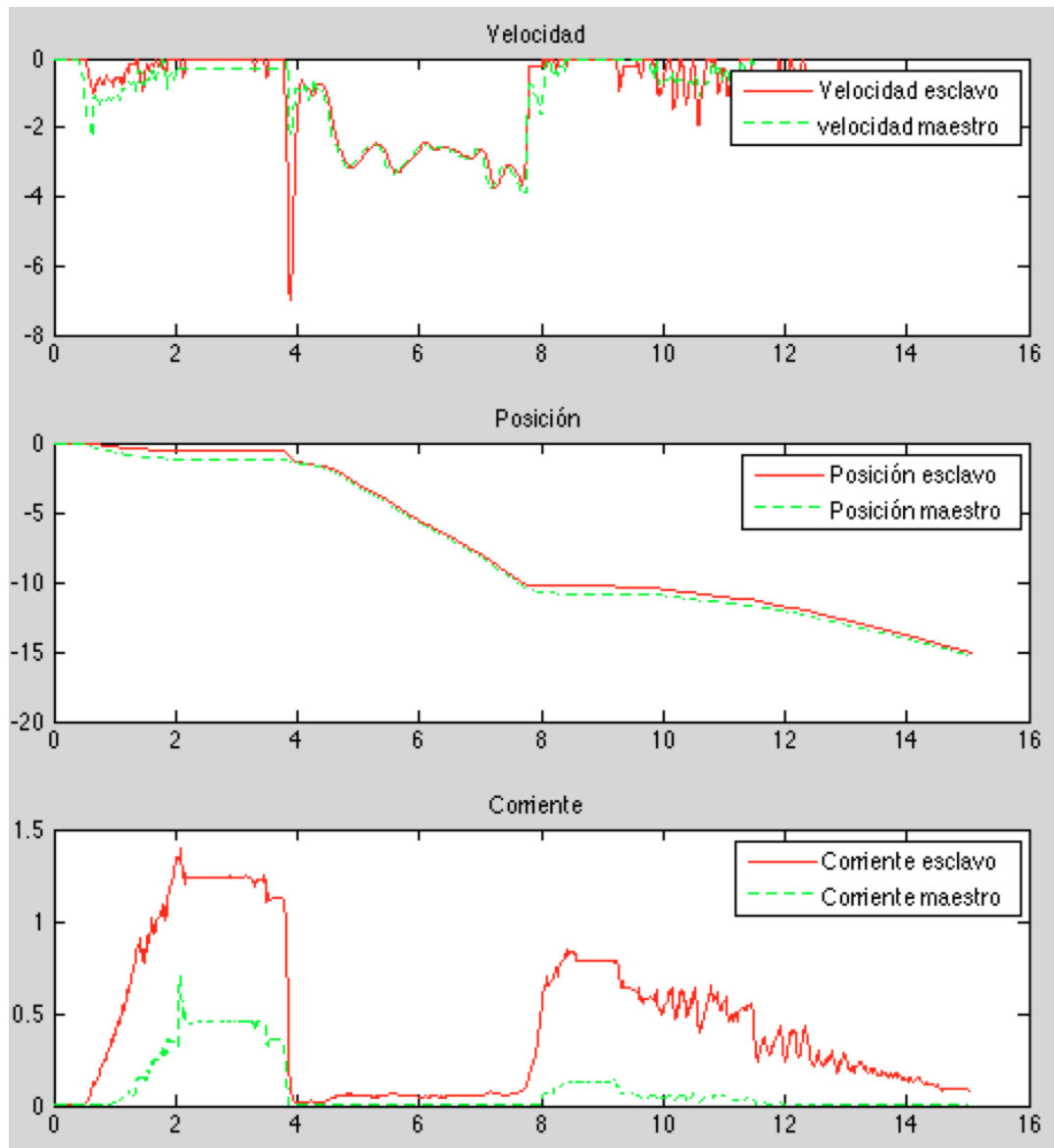


Figura 6.7: Gráfica de respuesta a la aproximación exponencial

- Tras el primer medio segundo se realiza una fuerza grande sobre el motor esclavo hasta generar suficiente realimentación para que el usuario no pueda mover el disco el motor maestro. Claramente una fuerza genera un pico de corriente en el motor esclavo y por consiguiente el controlador la generara en el motor maestro. Se mantendrá en esta posición de bloqueo durante los próximos 3 segundos y

medio aproximadamente donde se vuelve a liberar.

- El segundo evento importante de este experimento es el que se produce en el segundo 8 donde se ejerce una fuerza suficiente como para parar el motor esclavo y se va liberando de la forma mas lineal posible. Podemos contrastar todo esto en las gráficas de posición y velocidad.

Podemos observar que la corriente que circula por los dos motores conserva casi el mismo perfil, salvo por que la corriente que circula por el motor maestro está por debajo en amplitud.

6.5. Hito 5: Controlador maestro. Aproximación logarítmica

Ahora se presentan dos Figuras 6.8 y 6.9 las dos con distintos patrones pero con el resultado esperado.

La Figura 6.8 es el resultado del experimento con el controlador logarítmico. El experimento se inicia dejando que el usuario maneje el motor maestro sin ejercer ninguna presión sobre el motor esclavo. Poco a poco se ejerce esa presión hasta conseguir que el usuario no pueda mover el disco. Se mantiene y luego se libera de forma repentina.

El análisis de la Figura 6.8 es el siguiente:

- Como se ve en la gráfica, poco después del segundo 4 se ve una bajada en velocidad que es producida por la resistencia ejercida en motor esclavo, que coincide con el primer pico de corriente, ahora el controlador es más rápido y hace que el usuario lo sienta de forma más brusca.
- En el siguiente tramo la fuerza aumenta de forma gradual, hasta que se detiene. Como se ve en la figura cuando el motor maestro se detiene la corriente de realimentación de éste es mayor que la del esclavo. Algo muy significativo.

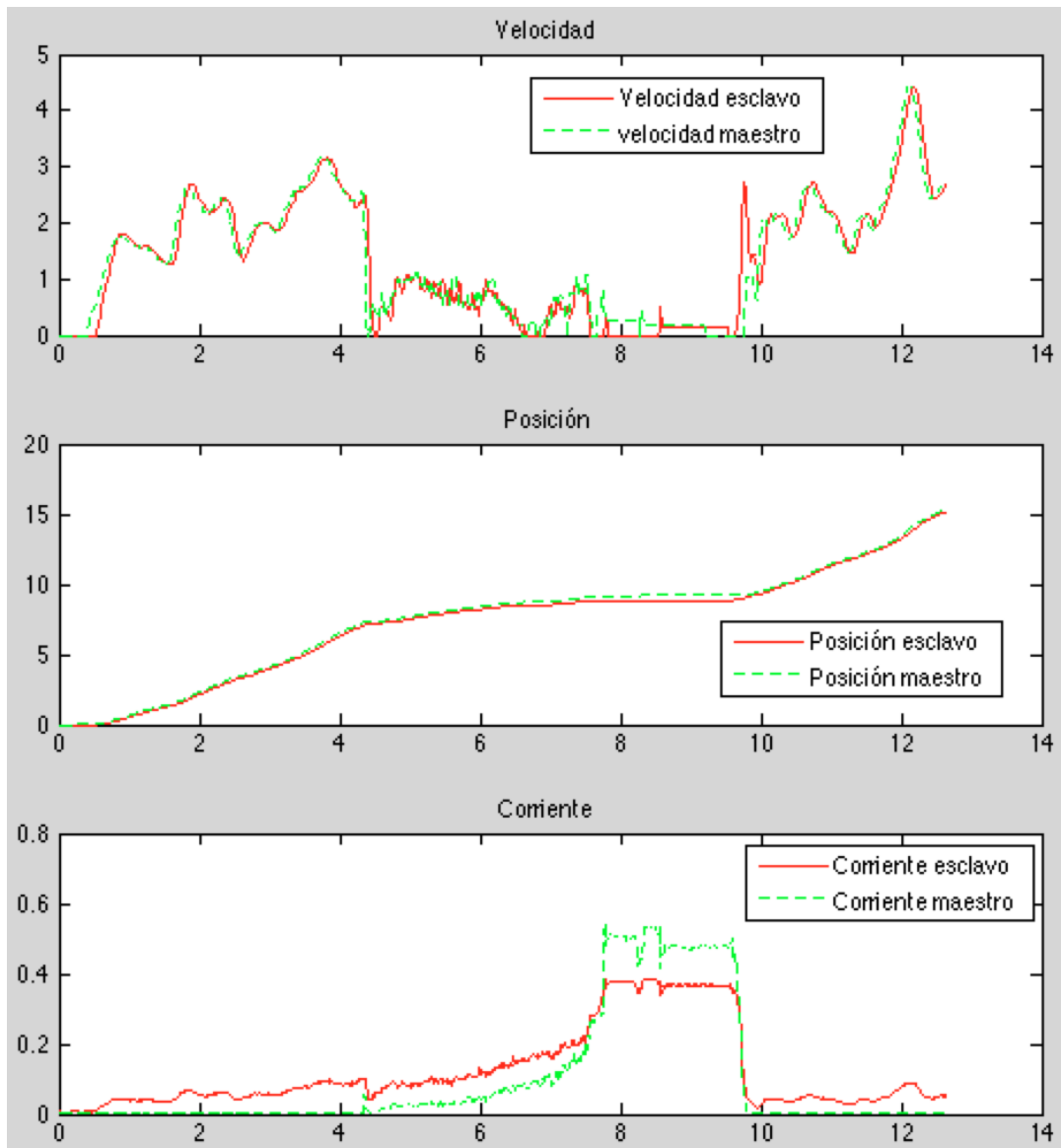


Figura 6.8: Gráfica de respuesta a la aproximación logarítmica

- El último evento es el que se produce en el segundo 10 cuando se deja libre el motor esclavo, enseguida se pierde la sensación de realimentación.

La Figura 6.9 responde a un perfil casi opuesto. Existe una subida incremental hasta que el usuario no puede girar el motor maestro. Una liberación de esta fuerza

seguida de otro frenado en seco y una liberación gradual.

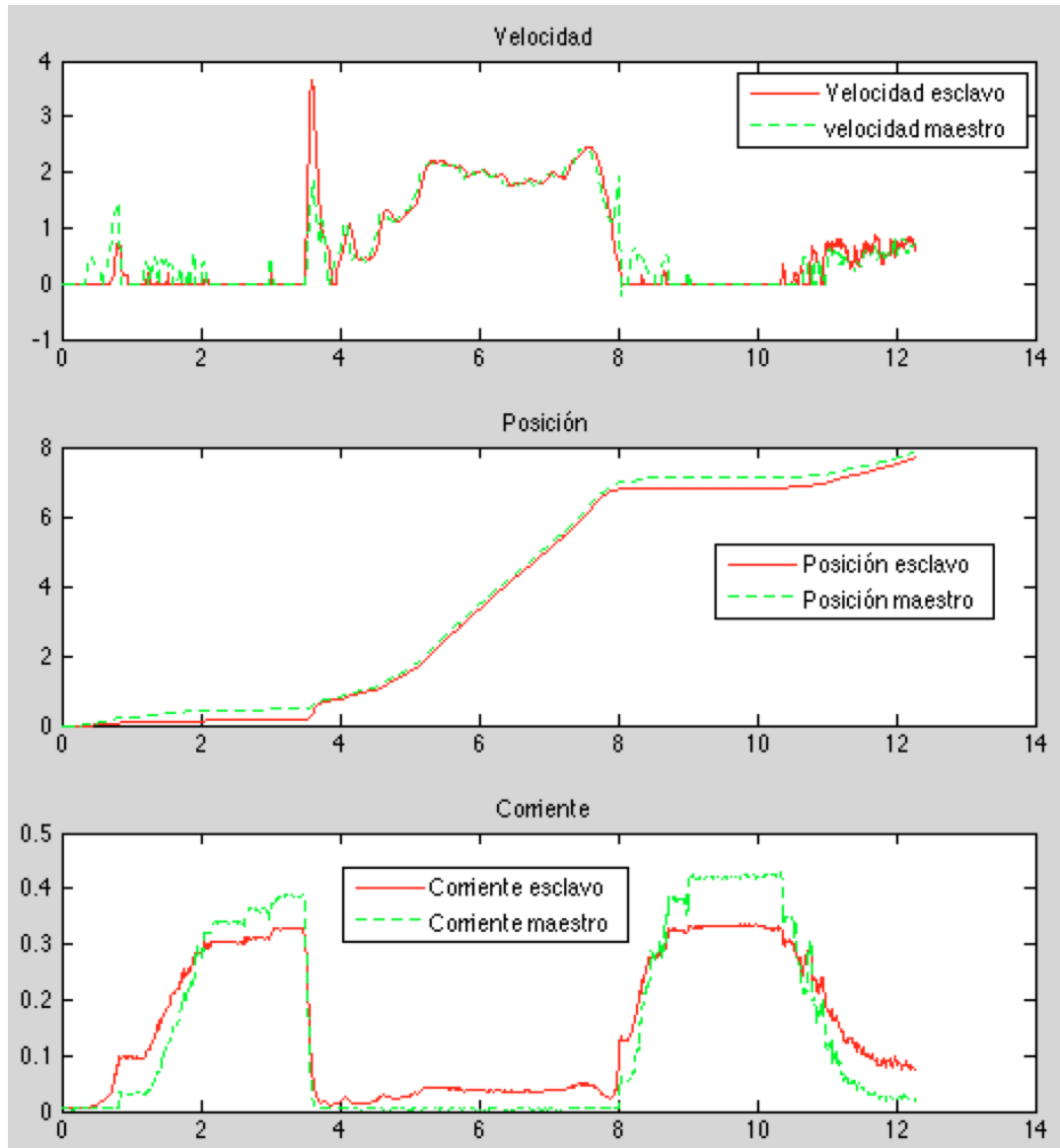


Figura 6.9: Gráfica de respuesta a la aproximación logarítmica

- Durante los dos primeros segundos se observa una presión incremental en el motor esclavo, aunque sea incremental enseguida se llega a detener el disco.

- Entre los segundos 3,5 y el 8,5 vemos que la corriente de realimentación descende de forma brusca y enseguida el usuario siente que mueve el motor maestro totalmente liberado hasta que se detiene por otro bloqueo del motor de esclavo.
- Por último desde el segundo 10 se ve como la bajada gradual es otra vez muy rápida a la par que lo fue la anterior. Éste era el resultado que se buscaba.

En el caso del controlador logarítmico vemos que una vez que se bloquea el disco esclavo la corriente de este es inferior a la del motor maestro. Esto es muy característico y muy reseñable.

6.6. Hito 6: Controlador maestro. Aproximación polinómica de grado 3)

Esta es la última aproximación, pero no por ello la menos importante. Como todas las aproximaciones anteriores ésta también está explicada de forma detallada en el capítulo anterior.

Teóricamente esta respuesta debería de ser la más lenta de todas, su repuesta es como indica la Figura 5.11.

Las dos figuras que se han utilizado para el estudio de este controlador son las 6.10 y la 6.11.

La Figura 6.10 es la respuesta al experimento en el cual sobre el motor esclavo del sistema háptico se ejerce una pequeña fuerza que se incrementa hasta detenerlo y luego se libera de forma repentina.

Si analizamos en detalle la Figura 6.10 podemos destacar:

- Primero se ve que en este caso poco después del segundo 4 empieza la realimentación, se aprecia que el usuario casi ni nota esta realimentación, ya que como indicamos anteriormente este es un proceso lento.

6.6. Hito 6: Controlador maestro. Aproximación polinómica de grado 3

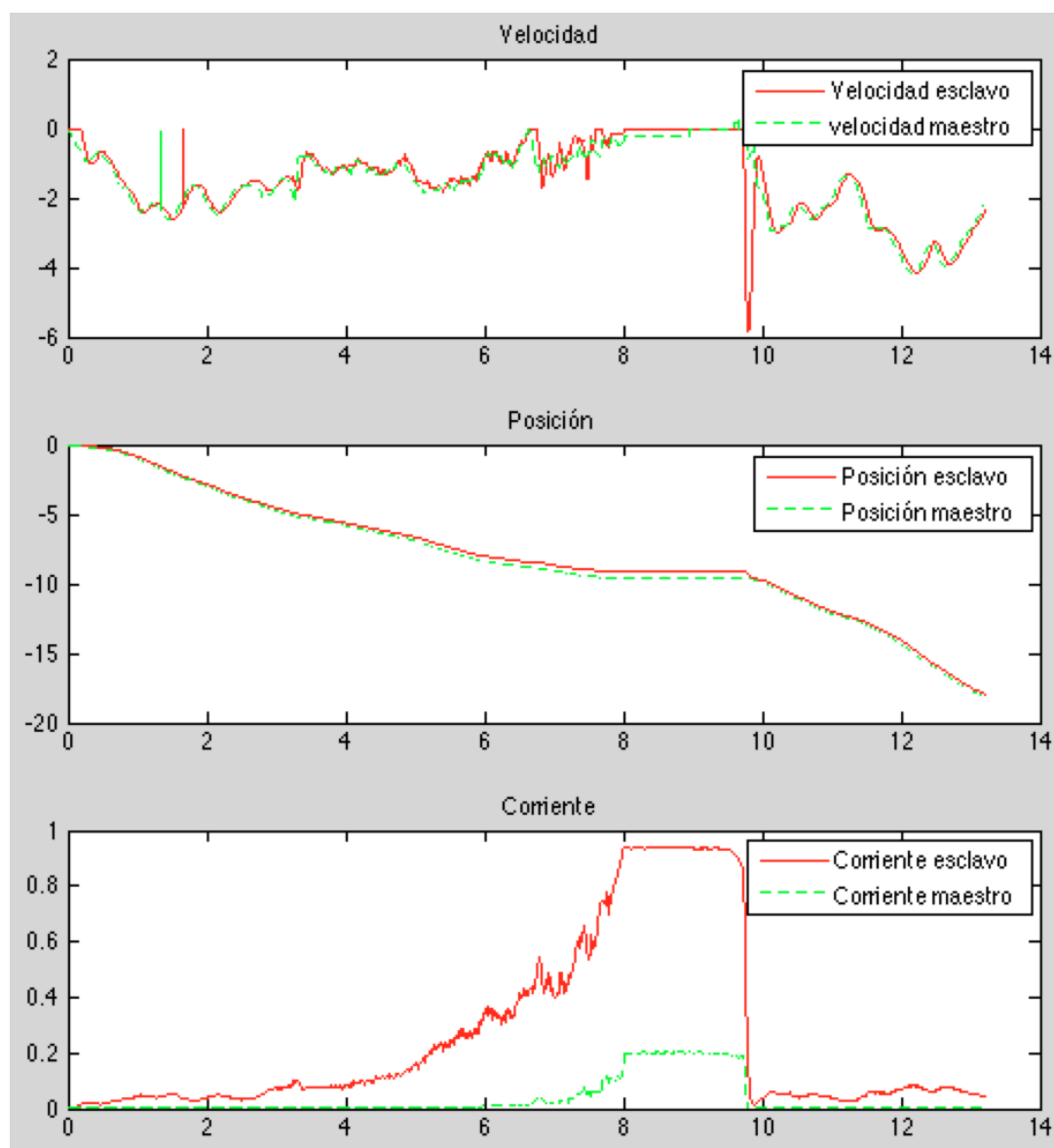


Figura 6.10: Gráfica de respuesta a la aproximación polinómica de grado 3

- El incremento de la fuerza ejercida sobre el motor esclavo durante los siguientes cuatro segundos intenta ser lo mas lineal posible, se aprecia que la corriente del esclavo sube y el incremento de la corriente de realimentación es mucho menor que los anteriores casos.

La última Figura es la 6.11. El experimento responde a la siguiente cronología. Primero se inicia con el motor esclavo bloqueado, luego se suelta y se deja libre, para después volver a bloquearlo y por último soltarlo poco a poco y de forma progresiva.

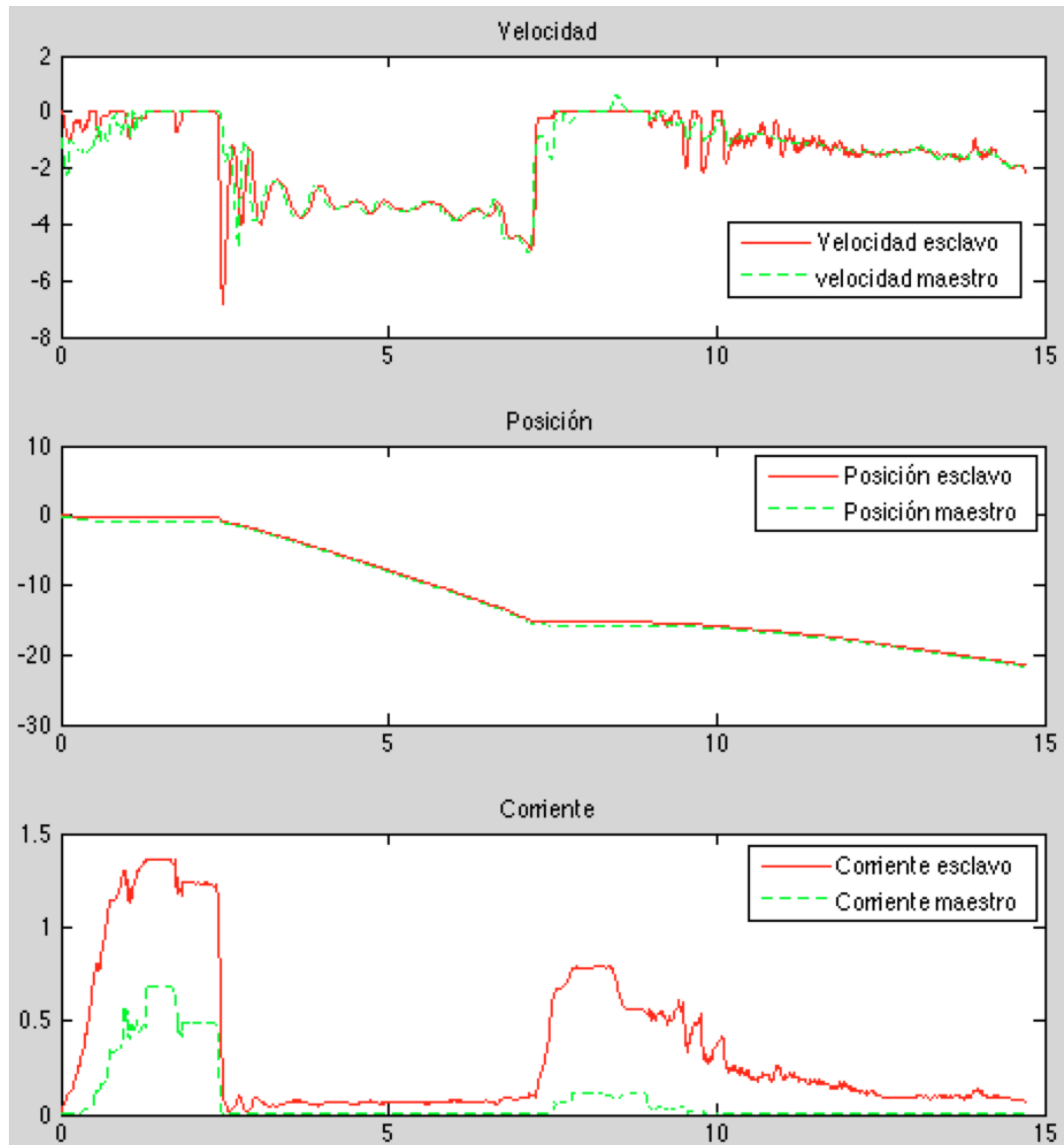


Figura 6.11: Gráfica de respuesta a la aproximación polinómica de grado 3

6.6. Hito 6: Controlador maestro. Aproximación polinómica de grado 3

- Vemos que el motor comienza bloqueado, si se observan las corrientes de los dos motores se aprecia que el perfil es el mismo en las dos; aunque la corriente del motor maestro mucho mas atenuada. En la velocidad y la posición se puede apreciar que esta bloqueado.
- Tras la liberación del motor el usuario pasa a tomar el control libre del motor maestro.
- Como se aprecia en la última subida y bajada de corriente, este caso de estudio es el más lento dentro de los que se han estudiado. Por lo que el usuario tiene una percepción de la realimentación mucho mas leve que en los otros casos.

Tras estos experimentos se ve de forma gráfica la respuesta de cuatro tipos de controladores de realimentación.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras

7.1. Conclusiones

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha implementado una primera aproximación a un sistema háptico. Se ha desarrollado el lazo de realimentación háptica. El sistema está compuesto por dos motores de corriente continua y un grado de libertad, que forman un sistema maestro-esclavo, un microcontrolador ARM y soportado sobre un entorno Linux.

Se han desarrollado los controladores que realizan la realimentación y se han propuesto y estudiado cuatro posibles soluciones válidas.

Tras los datos obtenidos en estos experimentos las conclusiones extraídas son las siguientes:

- La primera conclusión que podemos destacar es que se ha demostrado que mediante herramientas de software libre, es posible diseñar y desarrollar un sistema háptico para poder realizar las primeras investigaciones respecto a sistemas hápticos, sin tener que recurrir a caros y complejos sistemas hápticos comerciales, muchas veces limitados debido a la gran especialización de estos.
- Tras la primera implementación del controlador esclavo se aprecia que existe una diferencia entre la implementación teórica y la implementación mecánica real. Tras estudiar el problema con detenimiento se obtuvo que el par del motor

no se supera hasta que no se inyecta en el motor un voltaje superior a 0,5 voltios, lo que limita todo el desarrollo del proyecto.

Esto provoca que en la implementación del controlador esclavo se incorpore ese error que teóricamente no se está cometiendo, y nuestro error de posición se reduce en más de medio radián. Sabiendo y conociendo esta limitación continuamos con el desarrollo ya que consideramos el error como asumible.

- Tras la primera implementación del controlador maestro se aprecia una impedancia en el motor que aparece de forma inherente cuando se alimenta. Esta resistencia que se aprecia, es muy notable para el desarrollo del dispositivo ya que esta impedancia genera una fuerza en contra del movimiento para el usuario. Esta resistencia hace que la realimentación sea perceptible cuando la fuerza en el motor esclavo es muy alta y por tanto demasiado tarde.

Para evitar esta situación y eliminar este comportamiento del motor se controla por software el funcionamiento del puente H del motor. De esta manera mientras el motor esclavo no se siente presionado por una fuerza exterior el motor maestro se mantiene en un estado de alta impedancia que hace que desaparezca esta resistencia tan molesta. Todavía existe una resistencia inherente al motor físico por el rozamiento, el cual asumimos como válido, ya que incluso el intento de eliminar esta resistencia haría que el usuario perdiera la sensación de realidad.

- Tras el estudio de los cuatro diferentes controladores de nuestro sistema podemos concluir diferentes cosas. Para ello en la Figura 7.1 tenemos unas gráficas que ayudarán a entender las ideas propuestas. En ella se puede ver ordenadas por orden descendente las cuatro gráficas de los controladores propuestos:
 - Aproximación lineal.
 - Aproximación exponencial.
 - Aproximación logarítmico.
 - Aproximación polinómico de grado 3.

Es una representación de un aumento incremental de la fuerza ejercida sobre el motor esclavo hasta que el usuario siente que el motor maestro, que es el que el usa, está bloqueado.

- En primer lugar se puede ver que el usuario siente esta sensación de bloqueo cuando se ejerce una corriente de aproximadamente 0,4 amperios. Como se indica en el capítulo 5 la corriente máxima que podemos inyectar en nuestro motor es de 2,088 amperios por lo que para la aplicación háptica nuestro margen dinámico útil acaba de reducirse al 25 %. Estamos ante un caso de sobredimensionamiento.
- A simple vista se puede comprobar que la única corriente esclava que supera la corriente maestra es la que genera el controlador logarítmico. Una gráfica logarítmica tiene un crecimiento mayor en los primeros valores y más tarde se estabiliza y los pequeños incrementos son mas imperceptibles. En este caso el usuario nota un aumento de la realimentación de una forma más rápida, esto es debido a que la fuerza que se tiene que ejercer para que el usuario perciba la sensación de bloqueo es prácticamente la mitad o un tercio, dependiendo si lo comparamos con la aproximación lineal o con la exponencial o polinómica de grado 3.
- Si volvemos a la primera gráfica se ve la aproximación lineal. En ésta simplemente se ve como la fuerza que siente el usuario es la más parecida a la que realmente se está produciendo sin sobrepasarla. En este sentido el usuario tiene una percepción realista.
- En los dos últimos casos, se ha estudiado las aproximaciones exponenciales y polinómica de grado tres, en los cuales las gráficas muestran claramente que la fuerza necesaria para producir la sensación de bloqueo al usuario son muy altas en comparación con las de los otros dos casos. De este hecho se pueden hacer diversas lecturas, la primera es que la “resolución” que el usuario tiene de la fuerza que está haciendo en el motor esclavo es muy baja,

ya que lo que él está sintiendo es prácticamente $1/3$ de lo que realmente se está ejerciendo. Así también si el usuario dispone de esta información y el objetivo de la aplicación para la que se utiliza el sistema háptico busca conocer la relación con la que se va incrementando o disminuyendo la fuerza que se está ejerciendo en el motor esclavo y no el valor real, sí que podría ser interesante el uso de estas aproximaciones.

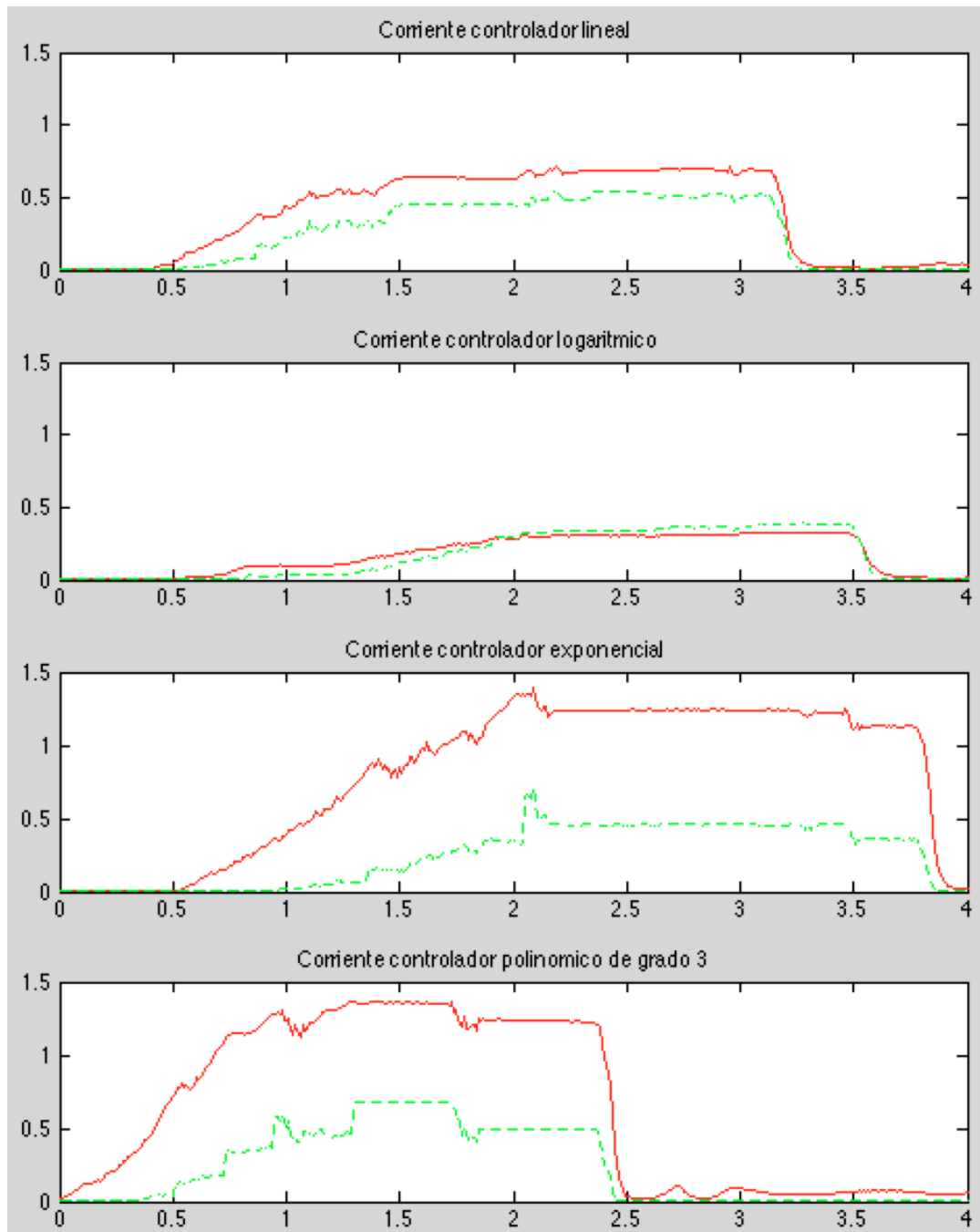


Figura 7.1: Comparativa de gráficas de los diferentes controladores implementados

- Tras desgarnar la figura 7.1 se puede concluir que tras el estudio realizado en

este Proyecto Final de Carrera para el sistema con el que se ha desarrollado en el laboratorio, en el cual el usuario percibe una sensación de bloqueo cuando se inyecta en el motor maestro una corriente de 0,4 A, el controlador que mejor transmite y que tiene los perfiles de corriente más parejos es el controlador logarítmico. Seguramente esta decisión en otro sistema con esta limitación no fuera la misma pero en el caso de estudio sí.

Tras todo lo descrito, se ve que se ha conseguido el objetivo principal del proyecto: diseñar e implementar un sistema háptico para el control de un motor de corriente continua.

7.2. Líneas futuras

Tras terminar este Proyecto Fin de Carrera, existen varias vías de mejora del sistema tanto a nivel hardware como software. Todas ellas implican ampliar la funcionalidad del sistema háptico.

7.2.1. Hardware

- Sería muy interesante realizar una mejora en los Filtros Salley-Key para que la corriente que proporcionaran tuviera menos ruidos.
- Para continuar de la investigación estaría bien realizar una estructura física, sirviéndose de los motores, que simulara unas tijeras o pinzas, de tal forma que se pudiera simular un entorno de trabajo. Para esto se tendrían que intentar solventar los problemas de impedancia inherentes en los motores.

7.2.2. Software

- El siguiente paso para continuar con la primera aproximación y el mejor funcionamiento sería el desarrollo de un PID que fuera capaz de controlar mejor la posición de los motores y su velocidad.

- Además, se podrían desarrollar diversas aplicaciones para ayudar a personas con discapacidades motoras en la mano o en la muñeca como la que se propone a continuación.

Disponiendo de dos motores uno de ellos se movería siguiendo un patrón, el cual el paciente pueda realizar y recordar, éste se estaría reproduciendo en uno de los dos motores y solo sirviendo como apoyo. El motor nuenca ejercería toda la fuerza, sino que sólo sería una ayuda o apoyo para el paciente. Todos estos sistemas pueden ayudar a plantear la rehabilitación de una forma más entretenida y autónoma para el paciente.

Bibliografía

Deborah Blum. *Love at Goon Park: Harry Harlow and the Science of Affection*. Perseus Publishing, 2002.

A.Luciani C.Cadoz and J.Florens. *Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms: The CORDIS system*. Comput. Music J., vol. 8, no. 3, 1984.

Force Dimension. URL <http://www.forcedimension.com>.

J.JBlatter F.P.Brooks Jr., M.OuhYoung and P.J.Kilpatrick. *Project GROPE haptic displays for scientific visualization*. Conf. Computer Graphics and Interactive Techniques, 1990.

L.H. Goldish and H.E. Taylor. *The Optacon: A Valuable Device for Blind Persons*. NEW OUTLOOK FOR THE BLIND, 1974.

Harlow MK Harlow HF, Dodsworth RO. *Total social isolation in monkeys*. Proc Natl Acad Sci USA, 1965.

Vicent Hayward and Karon E. Maclean. *Do It yourself Haptics: Part I*. IEEE Robotics & Automation Magazine, December 2007.

H.Iwata. *Artificial reality with force-feedback: Development of desktop virtual space with compact master manipulator*. ACM SIGGRAPH Comput. Graph., vol. 24, no. 4, 1990.

A. M. Knoll. *Man-machine tactile communication*. Ph.D. thesis, Polytechnic Inst., Brooklyn, NY, 1971.

Maxon. URL <http://www.maxonmotor.es>.

M.J.Rosen and B.D.Adelstein. *Design of a two degree-of-freedom manipulandum for tremor research*. IEEE Frontiers of Engineering and Computing in Health Care, 1984.

Félix Monasterio-Huelin. *Dispositivos Hápticos*. ETSIT UPM, Madrid, 2013.

George Popescu Mourad Bouzit, Grigore Burdea and Rares Boian. *The Rutgers Master II-new design force-feedback glove*. IEEE, Jun 2002.

B. Paul. *Kinematics and Dynamics of Planar Machinery*. Prentice Hall, 1979.

SenseGraphics. URL <http://www.sensegraphics.com/index.php>.

laboratory twente Virtual Reality. URL <http://www.sensegraphics.com/index>.

Wiki, a. URL [http://en.wikipedia.org/wiki/Sallen\OT1\textendashKey_topology](http://en.wikipedia.org/wiki/Sallen%20T1%20textendashKey_topology).

Wiki, b. URL http://en.wikipedia.org/wiki/H_bridge.

Wiki, May 2014. URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Haptics>.