



POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA,
INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

CENTRO DE AUTOMÁTICA Y
ROBÓTICA (CAR-UPM-CSIC)



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

MASTER UNIVERSITARIO EN AUTOMATICA Y ROBOTICA

AVANCES

Trabajo presentado por

Para la asignatura de

En la convocatoria de

Tutor

Julián Caro Linares

julian.caro.linares@alumnos.upm.es

☐ Avances en Control

☒ Avances en Robótica

☐ Avances en Percepción

29/6/2016

Antonio Barrientos

TITULO

**Desarrollo de una arquitectura de control híbrida
bioinspirada para su aplicación en robots
caminantes**

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Hipótesis y objetivos | 1 |
| 1.1. Hipótesis | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 2. Estado del arte | 4 |
| 2.1. Biorrobótica | 4 |
| 3. Propuesta de validación de hipótesis | 7 |
| 3.1. Sistema de alto nivel | 7 |
| 3.1.1. Microcontrolador | 8 |
| 3.1.2. Microordenador | 9 |
| 3.2. Sistema de bajo nivel | 10 |
| 4. Método de evaluación | 12 |
| 4.1. Búsqueda de soluciones de locomoción en la Biorrobótica actual . . . | 12 |
| 4.2. Desarrollar una estructura de control <i>Alto nivel-Bajo nivel</i> | 12 |
| 4.3. Prototipo que implemente la hipótesis propuesta | 13 |
| 4.4. Mejora de la locomoción y otros sistemas mediante aprendizaje | 14 |
| 4.5. Implementación de CPG | 14 |
| 4.6. Documentación, colaboración y difusión | 14 |
| 5. Conclusiones | 15 |
| Bibliografía | 16 |

Capítulo 1

Hipótesis y objetivos

El presente trabajo de *Avances en Robótica* se plantea como una primera fase exploratoria del trabajo de fin de Máster a realizar. A continuación se plantearán las distintas hipótesis y objetivos que servirán como base para la consecución del trabajo de fin de Máster que se está desarrollando.

1.1. Hipótesis

El uso de las estructuras y sistemas de control actuales ha supuesto un gran avance en el campo de la robótica. Por primera vez, y a pesar de las evidentes limitaciones, los robots son capaces de detectar su entorno con una gran variedad de sensores y navegar por él resolviendo distintas tareas.

Sin embargo, el uso de ruedas, un invento meramente humano, nos está limitando. Con el auge de la robótica de servicio estas han demostrado ser, en muchas ocasiones, insuficientes. Los robots de servicios deben moverse en entornos creados y pensados para seres humanos. Esto implica espacios pequeños llenos de obstáculos, como el interior de edificios, utilización de elementos del día a día, como sillas o mesas e, incluso, el uso de herramientas pensadas para un ser humano por parte del robot. Los robots con ruedas tienen, por tanto, problemas similares a los de las personas con movilidad reducida. Por este motivo se están desarrollando cada vez más robots con piernas y de aspecto humanoide.

Un caso en el que se hizo patente la necesidad de robots más flexibles fue el desastre de la central nuclear de Fukushima [1]. La gran cantidad de escombros, escaleras, y la necesidad de accionar elementos pensados para los humanos tales como válvulas, enchufes o simples pomos de puertas, sumados al gran problema de los elevados niveles de radiación, supusieron que un robot tras otro llevaran a cabo sus tareas de forma muy limitada antes de que la radiación acabará con sus circuitos. De esta necesidad surgieron competiciones como el *DARPA Robotics Challenge* [2]. A pesar del gran esfuerzo por parte de empresas y universidades, observando esta competición queda patente las limitaciones de la robótica actual, donde los robots, casi todos bípedos debido a la inclinación natural de crear robots similares a los humanos para moverse por entornos humanos, necesitan de un sistema de control excepcional para el control

de sus articulaciones así como el constante control por parte de un ser humano. Los robots humanoides, aún con la ventaja de su gran flexibilidad, son costosos, inestables y, actualmente, poco útiles en entornos reales.

Por este motivo cada vez más instituciones optan por ofrecer soluciones alternativas a dichos problemas, muchas de ellas inspiradas en la naturaleza. Así un robot serpiente puede ser de gran utilidad en labores de rescate o exploración de tuberías como las de los reactores de Fukushima [3]. Un robot cuadrípodo puede servir de mula de carga del siglo XXI para cubrir grandes distancias en terreno abierto [4] o pequeños robots, inspirados en el comportamiento de los insectos, pueden actuar como un enjambre para la consecución de distintos objetivos [5].

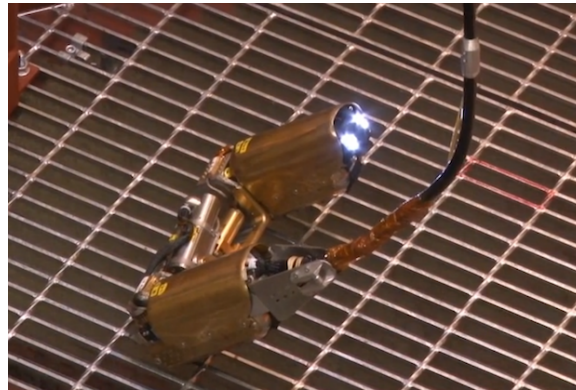


Figura 1.1: Serpiente robótica creada por la compañía *TEPCO*. A pesar de estar diseñado a propósito para la tarea, el robot quedó finalmente atascado en las tuberías del reactor de la central nuclear de Fukushima.

El ser humano ha mirado siempre a la naturaleza en busca de inspiración, bien para adaptarla a sus necesidades, bien para imitarla y aprender de ella. La robótica actual, al igual que otras materias, está fuertemente limitada por la especialización de su propio campo de estudio, en el que cada vez son más necesarios conocimientos de neurología, biología u otros.

La hipótesis de este proyecto plantea para el sistema de control de la marcha de un robot con patas, el uso de un sistema híbrido bioinspirado en el binomio *Cerebro-Sistema nervioso periférico (SNP)*, presentando una alternativa a la aplicación del control de bajo nivel mediante la utilización de circuitos electrónicos implementados en una FPGA en vez de un microprocesador. Todo ello con el objetivo de plantear nuevas soluciones para hacer más abordable la locomoción y sensorización en la robótica actual.

1.2. Objetivos

Para trabajar en el desarrollo y validación de la hipótesis planteada, se establecen los siguientes objetivos:

- **Desarrollar una estructura de control *Alto nivel-Bajo nivel*:** en robots donde el alto nivel sea gobernado por un microprocesador que envíe ordenes de

alto nivel a un sistema de bajo nivel y alta velocidad de respuesta. Para ello el bajo nivel puede ser realizado mediante circuitos básicos implementados en una FPGA o similares para las tareas básicas de locomoción. De esta forma se libera tiempo de procesamiento para que el alto nivel pueda especializarse en el tratamiento de información, aprendizaje y toma de decisiones.

- **Búsqueda de soluciones robóticas bioinspiradas:** al ser un sistema fuertemente inspirado en la naturaleza, se hace necesario realizar una visión global del estado del arte de este campo de estudio.
- **Uso de FPGAs en robots:** con la utilización de FPGAs para las órdenes de bajo nivel, surge la necesidad de plantear una visión general de su uso en la robótica actual, poniendo especial hincapié en el desarrollo y uso de *FPGAs Open Source* [6].
- **Justificación y uso:** analizar los pros y contras de este tipo de control frente a otras estructuras convencionales para llegar a conclusiones sobre en qué casos puede o no suponer una ventaja para el desarrollo en un robot. Para ello se realizarán distintas pruebas en robots sencillos con el objetivo de analizar dichas ventajas e inconvenientes.
- **Robot prototipo:** construir un prototipo de robot cuya locomoción sea modular, escalable, y a ser posible bioinspirada. El objetivo es demostrar cómo la utilización de esta estructura puede suponer una seria ventaja en la utilización de robots con sistemas de locomoción en los que el uso de múltiples grados de libertad de forma simultánea o sensorización sea un punto crítico en su desarrollo.
- **Implementación de CPGs:** utilizar un modelo de *Central Pattern Generator* básico implementado en una FPGA para controlar los movimientos de un robot con el objetivo de aproximarse a una locomoción animal para analizar las ventajas de estas frente a otros sistemas de locomoción. Para ello deberán establecerse una serie de criterios o índices que permitan comparar y analizar dichas ventajas e inconvenientes mediante la realización de experimentos con diferentes arquitecturas de control,
- **Implementación de otros mecanismos bioinspirados:** explorar otros posibles campos en los que se pueda aplicar el sistema de control planteado, como la percepción del entorno del robot u otros buscando su equivalente al de la locomoción robótica y los *CPG* dentro de dichos campos.
- **Mejora de la locomoción y otros sistemas mediante aprendizaje:** experimentación con sistemas de aprendizaje que mejoren, casi en tiempo real, la locomoción del robot. Para ello el sistema de alto nivel puede implementar programas de *Machine learning* que modifiquen los circuitos, y por tanto los sistemas de locomoción u otros, del sistema de bajo nivel.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se plantea el estado del arte de la biorrobótica actual. Los sistemas más estudiados actualmente y sus posibles aplicaciones.

2.1. Biorrobótica

El ser humano es una especie animal muy especial. Si tenemos en cuenta la teoría de la evolución de las especies de Charles Darwin, y sus posteriores desarrollos, llegamos a la conclusión de que la evolución en el planeta Tierra ha sido provocada por la selección natural y, por tanto, la capacidad de cada individuo de adaptarse al medio que le rodea, por lo que la flexibilidad ante el cambio ha sido y es un aspecto fundamental en la evolución[7].

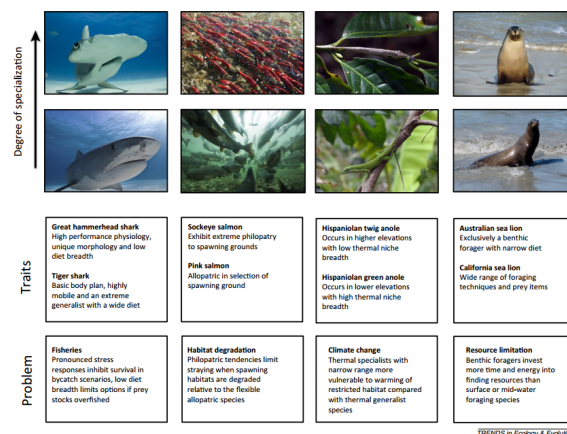


Figura 2.1: Ejemplo expuesto en el artículo [7] donde se muestran especies de animales con un alto grado de especialización a su medio y los posibles riesgos que ello conlleva.

Sin embargo, la peculiaridad de la evolución del *homo sapiens sapiens* no reside en su capacidad fisiológica ante el cambio. El ser humano no adapta su cuerpo a un nuevo medio, sino que crea herramientas, conforma y modifica el propio medio para su propio beneficio, muchas veces inspirándose en él. En ese sentido, y dejando de lado la evidente sobreexplotación del medio, el ser humano es un animal que, gracias

a su intelecto y su capacidad de crear herramientas, es capaz de vivir en los ambientes más extremos del planeta e, incluso, fuera de él.

El campo de la biorrobótica no es más que una consecuencia directa de nuestra forma de ver el mundo. En pleno siglo XXI, en el que siglos de estudio aportan soluciones a prácticamente cualquier problema, aún nos encontramos con limitaciones de todo tipo que frenan nuestro desarrollo. Es en esos momentos cuando los seres humanos miramos a la naturaleza en busca de inspiración. Cada especie pasada y actual es la consecuencia de miles de años de selección natural, mutaciones, perfeccionamiento y adaptación al medio y cada problemática que éste presenta. Parece por tanto razonable tratar de adaptar soluciones naturales a campos de estudio tan artificiales como el de la robótica con el razonamiento de que, si funciona en la naturaleza, es una solución de calidad.

Así pues la Biorrobótica es el campo de estudio que trata sobre la construcción de robots biológicamente inspirados, ya sea en su diseño, mecánica, locomoción, actuadores y sensores o sistemas de control. La Biorrobótica es un campo de estudio que no solo se inspira en la naturaleza para su aplicación en el campo de la robótica, sino que también puede ser de gran utilidad para ampliar y facilitar la investigación en campos de estudio como la Biología y la Neurología. Tal es el caso del robot salamandra creado por Auke Jan Ijspeert et al [8] cuyo creación y uso tuvieron como principal objetivo el crear una plataforma donde se pudiera poner a prueba la hipótesis del modelo locomotor de la salamandra real basado en la estructura de CPGs [9].

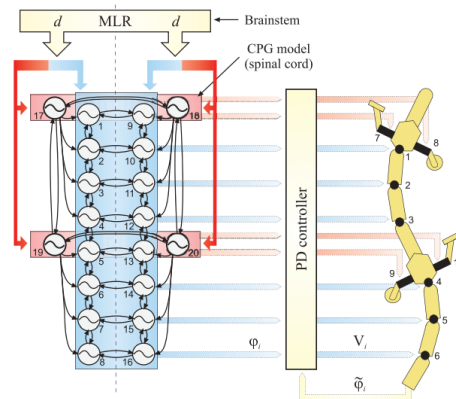


Figura 2.2: Modelo de locomoción de una salamandra junto a su prototipo robótico [8]. El modelo se basa en movimientos oscilatorios generados por las estructuras de control conocidas como *Central Pattern Generator* o CPG.

Otro ejemplo notable en el que el comportamiento de los animales inspira un desarrollo robótico es la biomecánica con la que se pretende imitar aspectos mecánicos sacados de la naturaleza para, generalmente, conseguir locomociones más estables y eficientes. Un ejemplo de ello es el pequeño robot Cheetah-Cub [10] basado en la mecánica de locomoción de los gatos y otros felinos y cuya locomoción se basa en la estructura de un pantógrafo, siendo un sistema capaz de autoestabilizarse, aún en bucle abierto, ante pequeñas perturbaciones u obstáculos, gracias a su mecánica bionspirada[11]. En la misma línea está el robot MIT Cheetah inspirado en la forma

y locomoción del leopardo y que es capaz de realizar saltos de obstáculos de distintas alturas gracias a un sistema laser y la excelente configuración de sus patas [12].

Una de las empresas que más aprovecha la inspiración animal en el desarrollo de sus robots es la empresa alemana *Festo*. *Festo* ha creado una gran cantidad de robots bionspirados tanto en forma como en características. Ejemplos son su robot canguro [13] capaz de moverse al igual que su homónimo y de recuperar parte de la energía del anterior salto para el siguiente. Este tipo de robots que imitan la locomoción de animales terrestres, aparte de la mejora de nuestro conocimiento biomecánico, tienen aplicaciones en su uso sobre terrenos abruptos o, incluso, como bestias de carga, como sucede con AlphaDog de *Boston Dynamics* [14].

El uso de la biorrobótica permite también afrontar con éxito locomociones en entornos en los que la mecánica tradicional necesita cambiar su planteamiento. Un ejemplo es en el vuelo, donde podemos encontrar ejemplos bionspirados como el del robot murciélago creado por el *CAR* [15], o la libélula y la gaviota de *Festo* [16] [17]. Este tipo de robots pueden ser utilizados para labores de vigilancia o control de un medio natural, como la monitorización de incendios, contaminación, u otros aspectos en parques naturales, siendo su impacto ambiental mucho menor frente a otras alternativas.

El uso de robots bionspirados en ambientes acuáticos, aún en un desarrollo muy temprano, presenta importantes aplicaciones en un medio donde las reglas de la locomoción cambian. Son buenos ejemplos robots como la medusa Aquajelly [18] o los peces de Maurizio Porfiri et Al [19]. Otro caso es el robot híbrido creado por la UPM [20] y que pasa de un robot clásico marino a una locomoción animal para explorar el fondo oceánico. Estos robots presentan grandes ventajas a la hora de explorar medios marinos, siendo una gran herramienta en el campo de la biología marina al imitar a animales propios del medio.

Pero el campo de la biomimética no es el único que se utiliza en la biorrobótica. Aparte de la imitación de cuerpos y locomociones animales, existen otros campos como el estudio de comportamientos emergentes a través de la creación de enjambres de robots que, con una serie de reglas básicas, son capaces de realizar tareas tales como la auto-organización del enjambre, tal como hace el robot Kilobot [21], o la imitación de la comunicación química de las hormigas para crear una ruta entre la comida y el hormiguero [22].

Por último, destaca también la imitación y estudio de las estructuras de control en la locomoción de robots. Suelen basarse en el concepto de CPG o *Central Pattern Generator* un concepto del campo de la neurobiología que explica cómo un conjunto de células interconectadas son capaces de generar patrones de señal rítmicos y oscilatorios en los que se basan muchos movimientos animales. Debido a la complejidad de los sistemas nerviosos animales, estos CPGs se implementan basándose en animales con sistemas simples tales como la lamprea [23] o la ya mencionada salamandra [8]. Este campo de estudio puede resultar fundamental para entender la forma en la que la naturaleza controla la locomoción de forma eficaz y eficiente, aplicando esos mismos principios a sistemas de control artificiales.

Capítulo 3

Propuesta de validación de hipótesis

Como se mencionó en el apartado 1, la principal hipótesis del TFM es la experimentación en la creación de un sistema híbrido de control bioinspirado como alternativa en la creación de los robots actuales. Este sistema de control estaría fuertemente basado en sistemas de control estudiados dentro de la locomoción y percepción de su medio en especies animales.

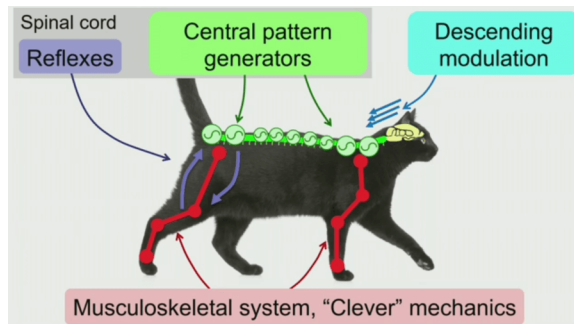


Figura 3.1: Estructura básica de la locomoción animal planteada por A.Spröwitz [10] y basada en CPGs (apartado 2.1)

El sistema trataría de imitar el binomio de control *órdenes de alto nivel-órdenes de bajo nivel* presente en la naturaleza, estando formado por un control de alto nivel y uno de bajo nivel. A continuación se presentan ambos sistemas y las distintas opciones para la implementación de los mismos.

3.1. Sistema de alto nivel

El sistema de alto nivel se encargaría del procesamiento complejo de la información recibida por los sensores, la toma de decisiones y la planificación de los próximos movimientos del sistema de forma general. Para ello el sistema de alto nivel tendría como base un microprocesador. Debido a los recursos disponibles, la facilidad de

manejo y el deseo del desarrollo de robots lo más pequeños posibles, se barajan dos soluciones técnicas a implementar:

3.1.1. Microcontrolador

El uso de un microcontrolador que administre las entradas y salidas de alto nivel para comunicarse con el sistema de bajo nivel u otros sistemas se plantea como una opción interesante a utilizar. Existen numerosos microcontroladores en el mercado que, por su configuración, pueden ser de gran utilidad en el desarrollo de sistemas robóticos con un gran rango de recursos y precios. Dado el deseo del trabajo de experimentar, diseñar e implementar el sistema sobre robots reales, se plantearía el uso de microcontroladores *Open Source* como aquellos de la familia *Arduino UNO* y similares.

Los microcontroladores *Open Source* fueron creados con el deseo de facilitar las prácticas de electrónica y automatización en universidades, así como ofrecer un dispositivo barato, fácil y práctico para otros campos culturales como el del arte contemporáneo. En la actualidad es ampliamente usado como herramienta educativa en escuelas, institutos, universidades y otras instituciones. También tiene una gran presencia en la electrónica y robótica a nivel de hobby, destacando en el movimiento *Maker* que busca la creación de pequeños automatismos y soluciones caseras para cualquier necesidad actual. Derivado de este movimiento, este tipo de microcontroladores *Open Source* son ampliamente usados en la creación de productos basados en el internet de la cosas o *IoT* por parte de numerosas *Startups* que se financian a través de campañas de micromecenazgo.

Dentro del ámbito de la investigación universitaria, los microcontroladores *Open source* representan una primera aproximación al problema a investigar razonable, siendo en muchas ocasiones suficiente para el objetivo perseguido. Son por tanto, una herramienta de prototipado rápido que permite, a un costo muy pequeño, experimentar con distintos caminos antes de emprender el camino y estudio hacia prototipos de mayor complejidad y coste.

La mayoría de microcontroladores basados en la familia Arduino utilizan un microprocesador como el ATMEGA328P o similares. Estos microcontroladores, si bien no son muy potentes, son suficientes para la realización de numerosos sistemas básicos de automatización y la creación y control de pequeños robots. Además poseen una gran comunidad y documentación detrás, existiendo placas adicionales o *shields* para practicamente cualquier finalidad, por lo que son una gran opción de cara al desarrollo del sistema. La mayoría de estos sistemas pueden ser programados en lenguaje *Arduino*, un lenguaje simplificado de C y C++ y basado en *Processing*, o en otros muchos lenguajes, tales como C y C++, Java, Python o herramientas de simulación matemática y de control como Matlab y Simulink.

Sin embargo poseen importantes limitaciones en su memoria, velocidad de procesamiento y resto de capacidades. Estos microcontroladores son generalmente usados como un único sistema de control que combina el alto y bajo nivel, debido a su baja velocidad de procesamiento, implica importantes limitaciones en la sensorización y actuación de un sistema robótico, siendo muy difícil la creación de un sistema en el

que se den procesos cuasi simultáneos sin aumentar el número de procesadores. Dado que el objetivo del proyecto es que el sistema de alto nivel se encargue solo de procesar información de alto nivel como la toma de decisiones, así como el cambio y evolución en tiempo real del sistema de bajo nivel, se plantea el uso de microcontroladores solo como sustituto esporádico del control de alto nivel para la experimentación con la estructura de bajo nivel, pero no como sistema principal y final del control de alto nivel.

3.1.2. Microordenador

Dado las limitaciones en el uso de microcontroladores como *Arduino* se plantea el uso de microordenadores como sistema de control de alto nivel. Debido a la ley de Moore, la electrónica ha experimentando un crecimiento periódico en la capacidad de los microprocesadores. Esto, aparte del acceso a herramientas de procesamiento cada vez más potentes, ha permitido el abaratamiento progresivo de los microprocesadores anteriores teniendo acceso a ordenadores cada vez más baratos con la misma potencia. En los últimos años, y siguiendo el movimiento de hardware libre iniciado por *Arduino* han surgido distintos microordenadores de muy bajo coste entre los que destacan por su gran difusión el microordenador *Raspberry Pi*. En sus últimos modelos, este ordenador dispone de características interesantes como 1 GB de RAM, una velocidad de CPU considerable y protocolos de comunicación tales como bluetooth y wifi. Aparte de varios puertos USB, una salida HDMI y una de audio tipo jack, el dispositivo suele disponer de pines GPIO para la comunicación con otros aparatos, lo que lo hace ideal como sistema de alto nivel en aplicaciones de IoT, robótica y otros. Su pequeño tamaño y bajo coste influyen también en su elección, ya que permiten el desarrollo de prototipos más baratos y pequeños, existiendo incluso modelos como *Raspberry pi Zero* o *C.H.I.P* capaces de ser integrados en espacios muy pequeños.

Pero la característica más importante que hace de un microordenador una gran elección es el software. Mientras que con el uso de un microcontrolador solo tenemos un sistema programable de entradas y salidas, con un microordenador disponemos de un sistema operativo completo. Los microordenadores actuales suelen utilizar distribuciones de Linux, generalmente basadas en *Debian* y optimizadas para estos. En los últimos tiempos también se han añadido otros SO como windows 10. Disponer de un sistema operativo basado en Linux ofrece grandes ventajas. Desde la creación de una plataforma de visión por computador simple utilizando Opencv, a infinitas opciones de programación en el alto nivel, conexión a internet y acceso al sistema mediante FTP, no siendo necesario conectar físicamente el robot a ningún monitor. Además, y basándose en los objetivos deseables de crear un sistema de alto nivel capaz de cambiar en tiempo real la configuración o programación del sistema de bajo nivel, el uso de un microordenador se presenta como una gran opción.

3.2. Sistema de bajo nivel

Junto al alto nivel, el objetivo del trabajo es utilizar una estructura de bajo nivel que sea la principal responsable de la locomoción, sensorización y control en detalle del robot. Si tenemos un control de bajo nivel directamente responsable de las órdenes de locomoción más detalladas y complejas, obtendremos un robot cuyo alto nivel podrá procesar más información y llevar a cabo más tareas de toma de decisiones y aprendizaje.

Como elemento que conformará el bajo nivel se plantea, en vez del tradicional uso de un microprocesador, la utilización de circuitos electrónicos simples para experimentar con la generación de locomociones simples, sensorización e, incluso, reflejos. Puede pensarse que la realización de circuitos electrónicos personalizados como sistema de bajo nivel supone una seria desventaja respecto al uso de un microprocesador, ya que parece necesario montar sistemas electrónicos a mano o PCBs personalizadas, con un gran coste de dinero, tiempo y habilidades.

Sin embargo el trabajo no pretende la creación de circuitos electrónicos tradicionales, si no la implementación de estos en una FPGA. Las FPGAs se han utilizado tradicionalmente para el testeo de circuitos electrónicos antes de su producción en masa, o para la experimentación de nuevos tipos de circuitos. Son capaces de almacenar (de forma volátil) numerosos circuitos dependiendo de su capacidad y, al ser circuitos físicos y no de programación mediante una serie de órdenes que se ejecutan de una en una, su velocidad y capacidad de respuesta es muy superior al de un microprocesador. Esto, que en un robot simple no supone una diferencia significativa de rendimiento frente al trabajo que supone la implementación en una FPGA, puede cambiar cuando hablamos de sistemas modulares, con un gran número de grados de libertad que tengan que ser accionados al mismo tiempo, o cuando se desea la respuesta a gran velocidad del robot ante estímulos, siendo una alternativa interesante en la implementación de reflejos en un robot.

Por otra parte, el uso de FPGAs para la implementación de circuitos simples como sistema de bajo nivel, permite aproximarse más aún al modelo de control animal previamente comentado, donde gran parte del trabajo se realiza mediante señales rítmicas periódicas (CPG) generadas directamente por el sistema nervioso central y activadas por el cerebro mediante una simple orden de alto nivel. El uso de una FPGA permite que este trabajo, en un futuro, pueda implementar un sistema de CPG simple con el objetivo de acercarse más aún a una locomoción bioinspirada.

Tradicionalmente, las FPGAs se han movido en el terreno de los grandes fabricantes, siendo propietarias y dependientes de softwares específicos y relativamente caros. Sin embargo, en el último año y medio, ha surgido un movimiento que, similar al observado en el campo de los microprocesadores y la impresión 3D, ha empezado a generar *FPGAs Open Source*.

Este nuevo movimiento surgió en 2015 con el proyecto IceStorm [24] liderado por Clifford Wolf y que consiguió generar un bitstream a partir de un código en *Verilog* mediante herramientas libres. Aun siendo un proyecto libre muy nuevo, solo compatible con dos modelos de FPGAs actualmente (Lattice modelos: HX1K-TQ144 y HX8K-CT256) y con ciertas limitaciones en su software, como no poder programar

actualmente en *VHDL*, si no solo en *Verilog*, el uso de FPGAs libres revela un gran potencial, desde una mayor autonomía por parte del desarrollador, a usos no previstos por el fabricante, creación de una comunidad que comparta y mejore el conocimiento e, incluso, la creación de repositorios de circuitos de hardware libre fácilmente reconfigurables.

Siguiendo este camino, Juan González Gómez y Jesús Arroyo han tomado como base el proyecto *IceStorm* y han iniciado el proyecto *FPGAwards* [6], del que cabe destacar la creación de una placa de desarrollo denominada *IceZum Alhambra*.

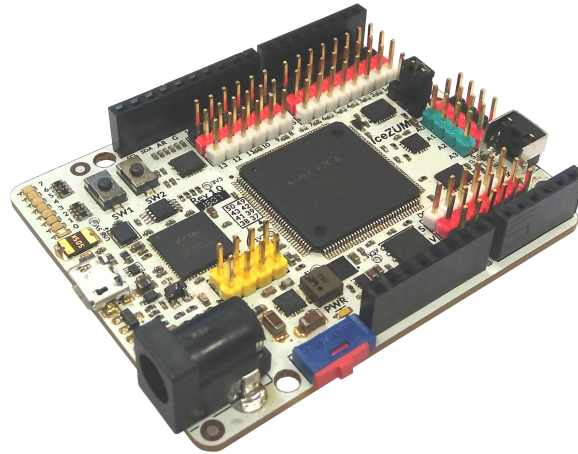


Figura 3.2: Icezum Alhambra. FPGA libre desarrollada con la estructura física de una placa Arduino [25].

La placa sigue el esquema de hardware y software libre promovido por Arduino. Su *PCB* y *pinout* siguen la misma estructura de éste por lo que es fácilmente compatible con una gran cantidad de electrónica acondicionada para el mundo Arduino e, incluso, compatible con sus *Shields*. Junto a la placa la comunidad está desarrollando tanto software gráfico, como *Icestudio* orientado a la creación y aprendizaje de circuitos electrónicos digitales mediante interfaz gráfica, como herramientas que faciliten la programación y carga del código descriptivo utilizado, integrándose en plataformas ampliamente utilizadas como *PlatformIO*.

Así pues, se pretende utilizar la Icezum Alhambra como sistema de bajo nivel, aportando, aprendiendo y contribuyendo en el proceso al conocimiento libre en el campo de las FPGAs y su uso en la robótica.

Mediante la utilización de un microordenador como la *Raspberry PI* como sistema de alto nivel, y el uso de una FPGA libre como la IceZum Alhambra para la implementación de los circuitos de bajo nivel, junto a la utilización de herramientas de prototipado rápido como la impresión 3D, se pretende la creación y experimentación con un sistema híbrido de control *alto nivel-bajo nivel*, fuertemente bioinspirado, que suponga una alternativa a otros medios de control tradicionales.

Capítulo 4

Método de evaluación

Para conseguir que el trabajo de fin de master cumpla los objetivos comentados en 1 y 3, se establecen los siguientes mecanismos para evaluar su avance y desarrollo.

4.1. Búsqueda de soluciones de locomoción en la Biorrobótica actual

Se propone la realización de un estado del arte que permita comprender el estado actual de la biorrobótica en el campo de la locomoción bionspirada, desarrollando un conocimiento sólido de la materia que permita implementar soluciones tanto dentro del propio proyecto, como de cara a desarrollos futuros. Para conseguirlo se realizará una lectura exhaustiva de la bibliografía existente así como la asistencia a conferencias y otros que traten la materia. Dado la gran cantidad de material existente en Internet e instituciones públicas, es posible llegar a un estado del arte apropiado sobre la materia.

4.2. Desarrollar una estructura de control *Alto nivel-Bajo nivel*

Para el desarrollo de la estructura de control *Alto nivel-Bajo nivel* propuesta en el trabajo, se utilizarán los medios descritos en el apartado de validación de la hipótesis 3, utilizando un microordenador como sistema de alto nivel y una FPGA para la construcción de los circuitos que actúen como bajo nivel. Para cumplir este objetivo, será necesario demostrar las principales diferencias del sistema propuesto respecto a otras estructuras de control, por lo que se deberán realizar pequeñas experimentaciones que comparen aspectos cuantitativos como el tiempo de respuesta ante un estímulo, la velocidad de ejecución, o la facilidad de control de la estructura de control propuesta frente a estructuras más tradicionales. Para ello se pueden utilizar pequeños robots simples, desde robots diferenciales a pequeños hexápodos u otros, que sean controlados con ambos sistemas. Dada la facilidad de crear este tipo de pequeños prototipos gracias a las impresoras 3D de bajo costo y electrónica simple

como la de Arduino, es posible realizar estos experimentos sin grandes dificultades, siendo además un paso fundamental para mejorar los conocimientos en la creación de los circuitos de la FPGA orientados al control robótico de bajo nivel que se aplicarán durante el proyecto.

4.3. Prototipo que implemente la hipótesis propuesta

Para demostrar que la estructura de control propuesta puede ser una alternativa real a otras estructuras de control, se diseñará, construirá y programará un prototipo de robot que utilice la estructura de control planteada. Dicho prototipo deberá tener las siguientes características:

- **Locomoción simultánea de varios grados de libertad:** Dado que la estructura de control propuesta se basa en la ventaja que supone la velocidad de actuación de circuitos físicos frente a microprocesadores, así como su actuación en paralelo frente a la secuencial del microprocesador, estas características deberán ser clave en el prototipo desarrollado. Se propone un prototipo con múltiples grados de libertad en su locomoción que utilice patas o similares.
- **Bioinspirado:** la hipótesis presentada se inspira en estructuras de control dadas en animales, lo que implica de por sí que el sistema sea bionspirado. Dado que se propone que el prototipo utilice patas, el paso natural es imitar una locomoción animal, e incluso sensorización y comportamiento, en el prototipo a realizar.
- **Modular y escalable:** una de las principales ventajas que puede tener la utilización de una FPGA en vez de un microprocesador para el control de bajo nivel, es la posibilidad de actuación en paralelo de múltiples grados de libertad junto a sensores u otros, al poder almacenar la FPGA numerosos circuitos. Esta ventaja es muy relevante en sistemas con muchos grados de libertad, ya que los sistemas programados pueden ser lentos a la hora de gestionar dichos movimientos, mientras que su implementación por *Hardware* permite su funcionamiento de forma distribuida, en paralelo y escalable. Por ello se propone para validar la estructura de control, un prototipo con múltiples grados de libertad. Sin embargo esto implica limitaciones técnicas, como la capacidad de la FPGA a utilizar, o el número de entradas y salidas, así como de recursos, donde más grados de libertad implica normalmente más motores y más coste. Por dicha razón el prototipo a realizar deberá ser modular y escalable de forma que se pueda demostrar con las limitaciones existentes que la estructura de control planteada funcionaría igual si se aumentará en escala.

4.4. Mejora de la locomoción y otros sistemas mediante aprendizaje

Dado que el uso de FPGAs libres significa una mayor libertad en las herramientas de software utilizadas y al disponer de un microordenador como alto nivel, es posible experimentar con sistemas de aprendizaje sencillos capaces de modificar el código *Verilog* del sistema de bajo nivel, siendo capaz de cambiar y hacer evolucionar el equivalente al sistema nervioso central del robot, casi en tiempo real. Esto permite que el robot pueda adaptar su sistema de control ante situaciones o escenarios no conocidos, como aquellos con obstáculos más grandes cambiando de tipo de locomoción o de amplitud de zancadas, o ante imprevistos en su propio sistema tales como la rotura de una pata, pudiendo construir nuevos circuitos en tiempo real que le permita resincronizar el movimiento para mantener una correcta locomoción. La consecución de este objetivo implica la implementación de sistemas de aprendizaje usando, por ejemplo, librerías de inteligencia artificial en lenguajes como C++ o Python. Si bien es un objetivo ambicioso, es posible llegar a una implementación sencilla que sea fácilmente ampliable en futuros proyectos.

4.5. Implementación de CPG

Basándose en el estado del arte estudiado y las habilidades adquiridas en el diseño de circuitos en la FPGA, sería deseable la implementación y experimentación con CPGs dentro del proyecto. Debido a la dificultad que tiene el estudio e implementación de los CPGs, se propone la implementación de un sistema básico de osciladores mediante CPG que permita la ampliación futura del trabajo.

4.6. Documentación, colaboración y difusión

En primer lugar la memoria propia del trabajo de fin de máster deberá ser completa y bien estructurada, permitiendo ser un apoyo real a trabajos futuros del mismo campo. Dado que el proyecto se apoya en numerosas herramientas y comunidades *Open Source*, se pretende colaborar, difundir y aportar con los conocimientos adquiridos a los repositorios de dichas comunidades. Además, se utilizarán una serie de entradas en formato blog para divulgar, de manera no oficial y desenfadada, la evolución del proyecto, así como las dificultades y curiosidades que implican la realización de un trabajo de fin de máster desde cero [26].

Capítulo 5

Conclusiones

El trabajo de la asignatura de *Avances en Robótica* presentado en este documento, tiene como objetivo el establecimiento de una hoja de ruta para la realización de un TFM fuertemente basado en el aprendizaje y la experimentación.

En una sociedad en la que las fronteras de los distintos campos de estudio son cada vez más difusas, la bioinspiración es hoy, más que nunca, un campo de estudio en el que desarrollar nuevas investigaciones para la resolución de viejos y nuevos problemas. En ese sentido, este trabajo ha presentado como el TFM ha realizar debe inspirarse en la naturaleza y los estudios previamente realizados en la biorrobótica para desarrollar una arquitectura de control híbrida y bionspirada que, aplicada a robots caminantes, permita desarrollar una alternativa a otros controles más tradicionales.

Para ello se plantea una estructura basada en el binomio *Cerebro-Sistema nervioso periférico (SNP)* que utilice como control de alto nivel un microprocesador que de ordenes a un control de bajo nivel desarrollado en *hardware* en vez de programación. Para ello se propone la utilización de FPGAs cuya principal ventaja es la velocidad de respuesta frente a un microprocesador a la hora de gestionar la locomoción de muchos grados de libertad de forma simultánea. El uso de FPGAs *Open Source* facilita el desarrollo de aplicaciones tales como la posibilidad de que el sistema de alto nivel re programe el *hardware* del bajo nivel casi en tiempo real, aprendiendo y adaptándose a situaciones imprevistas sin perder su velocidad y flexibilidad.

La fuerte democratización de la tecnología ha permitido que hoy, más que nunca, sea abordable el estudio e investigación en el campo de la robótica de forma cada vez más práctica. El uso de *hardware* y *software* libre, sin ser una norma general, facilita en muchas ocasiones las tareas y el desarrollo de muchos estudios y aplicaciones sin disparar la cantidad y coste de los recursos utilizados. En este trabajo se han presentado diversas alternativas basadas en *hardware* y *software* libre como principales recursos para la creación de un prototipo de robot caminante con patas en el que se implemente la arquitectura a desarrollar.

Como conclusión, el trabajo aquí presentado es una investigación que sienta unas bases sólidas para desarrollar el TFM planteado. Exponiendo sus principales hipótesis, campos de estudio, recursos disponibles, así como los criterios para probar dichas hipótesis y las posibles soluciones a los futuros problemas que puedan surgir. Siendo, por tanto, una guía fundamental que marcará el desarrollo del proyecto.

Bibliografía

- [1] “Los héroes robóticos de fukushima.” <http://www.xataka.com/robotica-e-ia/los-heroes-roboticos-de-fukushima> (último acceso: Mayo 2016), Marzo 2015.
- [2] “Darpa robotics challenge.” <http://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge> (último acceso: Mayo 2016), Junio 2015.
- [3] “Unlucky robot gets stranded inside fukushima nuclear reactor, sends back critical data.” <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/robot-stranded-inside-fukushima-nuclear-reactor> (último acceso: Mayo 2016), Abril 2015.
- [4] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and T. Team, “Bigdog, the rough-terrain quadruped robot,” in *Proceedings of the 17th World Congress*, vol. 17, pp. 10822–10825, 2008.
- [5] M. Rubenstein, A. Cornejo, and R. Nagpal, “Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm,” *Science*, vol. 345, no. 6198, pp. 795–799, 2014.
- [6] “Fpgawars: Tools for exploring the open side of the fpgas.” <https://github.com/FPGAWars> (último acceso: Mayo 2016), Abril 2016.
- [7] A. J. Gallagher, N. Hammerschlag, S. J. Cooke, D. P. Costa, and D. J. Irschick, “Evolutionary theory as a tool for predicting extinction risk,” *Trends in ecology & evolution*, vol. 30, no. 2, pp. 61–65, 2015.
- [8] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, and J.-M. Cabelguen, “From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model,” *science*, vol. 315, no. 5817, pp. 1416–1420, 2007.
- [9] I. Delvolvé, T. Bem, and J.-M. Cabelguen, “Epaxial and limb muscle activity during swimming and terrestrial stepping in the adult newt, *pleurodeles waltl*,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 78, no. 2, pp. 638–650, 1997.
- [10] A. Sprwitz, A. Tuleu, M. Vespignani, M. Ajallooeian, E. Badri, and A. J. Ijspeert, “Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with cheetah-cub, a compliant quadruped robot,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 8, pp. 932–950, 2013.

- [11] “Cheetah-cub robot mimics feline.” <https://youtu.be/frTmPdNzVPI> (último acceso: Junio 2016), Junio 2013.
- [12] “Mit cheetah robot lands the running jump.” https://youtu.be/_luhn7TLfWU (último acceso: Junio 2016), Mayo 2015.
- [13] “Kangaroo robot by festo.” https://youtu.be/_4luJ0ZSqy8 (último acceso: Junio 2016), Abril 2014.
- [14] “Ls3-legged squad support systems.” http://www.bostondynamics.com/robot_ls3.html (último acceso: Junio 2016), Junio 2016.
- [15] J. Colorado Montaña, *BaTboT: a biologically inspired flapping and morphing bat robot actuated by SMA-based artificial muscles*. PhD thesis, Industriales, 2012.
- [16] “Festo-bionicopter.” <https://youtu.be/nj1yhz5io20> (último acceso: Junio 2016), Marzo 2013.
- [17] “Smartbird-festo.” <https://www.festo.com/group/en/cms/10238.htm> (último acceso: Junio 2016), Enero 2012.
- [18] “Festo-aquajelly.” <https://youtu.be/N-08-N71Qcw> (último acceso: Junio 2016), Diciembre 2008.
- [19] P. Phamduy, C. Milne, M. Leou, and M. Porfiri, “Interactive robotic fish: A tool for informal science learning and environmental awareness,” *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 22, no. 4, pp. 90–95, 2015.
- [20] “Diverbot underwater humanoid robot.” <http://www.car.upm-csic.es/?portfolio=diverbot> (último acceso: Junio 2016), Marzo 2013.
- [21] M. Rubenstein, C. Ahler, and R. Nagpal, “Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 3293–3298, IEEE, 2012.
- [22] M. Dorigo, M. Birattari, C. Blum, M. Clerc, T. Stützle, and A. Winfield, *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence: 6th International Conference, ANTS 2008, Brussels, Belgium, September 22-24, 2008, Proceedings*, vol. 5217. Springer, 2008.
- [23] P. Arena, “The central pattern generator: A paradigm for artificial locomotion,” *Soft Computing*, vol. 4, no. 4, pp. 251–266, 2000.
- [24] “Project icestorm.” <http://www.clifford.at/icestorm/> (último acceso: Junio 2016), Mayo 2015.
- [25] “Icezum alhambra: an arduino/zum-like open fpga electronic board. synthesize hardware easily, using only open source tools.” <https://github.com/FPGAwards/icezum> (último acceso: Junio 2016), Junio 2016.

- [26] “Diario de un tfm.” <http://drmaker.es/category/tfm/> (último acceso: Junio 2016), Mayo 2016.
- [27] A. J. Ijspeert, “Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile locomotion,” *Science*, vol. 346, no. 6206, pp. 196–203, 2014.
- [28] A. J. Ijspeert, “Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review,” *Neural Networks*, vol. 21, no. 4, pp. 642–653, 2008.
- [29] M. Ambroise, T. Levi, S. Joucla, B. Yvert, and S. Saïghi, “Real-time biomimetic central pattern generators in an fpga for hybrid experiments,” *Neuromorphic Engineering Systems and Applications*, p. 134, 2015.
- [30] “Auke ijspeert: Un robot que corre y nada como una salamandra.” https://www.ted.com/talks/auke_ijspeert_a_robot_that_runs_and_swims_like_a_salamander?language=es#t-87728 (último acceso: Junio 2016), Diciembre 2015.