



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

SILLA DE GUÍA DE POSTURA

Autor: Pablo Corral Vila
Director: Kexin Hui

Madrid
Julio 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Pablo Corral Vila DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Silla de guía de postura, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción

de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 16 de julio de 2018

ACEPTA



Fdo. Pablo Corral Vila

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Silla de guía de postura
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2017/2018 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Pablo Corral Vila

Fecha: 15 / 07 / 18



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Kexin Hui

Fecha: 16 / 07 / 18





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

SILLA DE GUÍA DE POSTURA

Autor: Pablo Corral Vila
Director: Kexin Hui

Madrid
Julio 2018

SILLA DE GUÍA DE POSTURA

Autor: Pablo Corral Vila
Directora: Kexin Hui
Entidades colaboradoras: ICAI - Universidad Pontificia Comillas
University of Illinois

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

Los avances científicos y tecnológicos que se han producido en los últimos años han ayudado a mejorar la salud de las personas, pues la medicina ha mejorado. Una de las nuevas tendencias es la medicina preventiva, que, al contrario que la medicina tradicional, intenta evitar que los problemas de salud ocurran, en lugar de esperar a ello.

Un problema que puede ser solucionado mediante medicina preventiva es el dolor de espalda, pues, según la Asociación Quiropráctica Americana, la mayoría de casos tienen origen mecánico o no orgánico [1]. Esto es, no son causadas por lesiones o enfermedades graves. Una de las causas principales del dolor de espalda es la mala postura al sentarse. En este proyecto, se intentará buscar una solución para prevenir el dolor de espalda, ayudando a la gente a que no adopte malas posturas.

OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es usar una silla para añadirle diferentes sistemas electrónicos que harán posible la detección de la postura del usuario y le avisarán en caso de que su postura sea mala, para que la cambie, mediante la vibración de unos motores colocados en la silla. Principalmente, se buscará que la clasificación de posturas sea precisa, pues si no lo es y los motores se activan y desactivan cuando no deberían, el proyecto sería un fracaso.

También se tuvieron en cuenta otros objetivos secundarios. Se intentó que la clasificación de posturas no fuese muy estricta, sino conservadora, con lo cual, si la postura es intermedia, el sistema la tomaría como una buena postura. Esto se hizo buscando que el sistema no fuera intrusivo, es decir, que no activara y desactivara los motores al mínimo

movimiento. También se tuvo en cuenta la potencia que el sistema consumiría y se intentó minimizar su consumo, pues cuanto menos potencia consume, más durará la batería que lo alimenta. Por último, se intentó conseguir todos estos objetivos a un coste razonable.

METODOLOGÍA

El presente proyecto se realizó en el seno de la Universidad de Illinois, con comunicaciones puntuales con la Universidad Pontificia Comillas. Se hizo en un equipo de tres personas.

A continuación, se explica el funcionamiento de la silla y se indicarán los componentes que el autor de la memoria desarrolló. En la memoria descriptiva, se podrán encontrar descripciones más detalladas de estos componentes, así como de las decisiones de diseño que se fueron tomando con respecto a ellos.

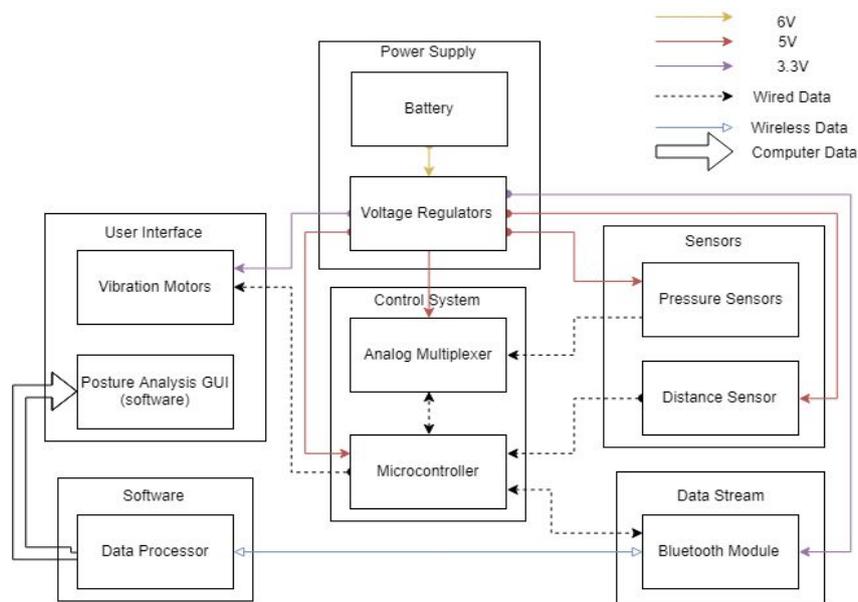


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.

Este diagrama de bloques describe, de forma esquemática, el funcionamiento del sistema. Los distintos módulos del sistema se alimentan a 5V o bien a 3.3V. Para alimentarlos a todos, se usó una batería de 6V y se adaptó esta tensión, usando reguladores de tensión.

Para conseguir la información de la postura del usuario, se usaron nueve sensores, divididos en dos tipos. Por un lado, se usaron ocho sensores de presión de tipo resistivo, con los cual se podía adquirir información sobre la fuerza con la cual el usuario se sienta contra las diferentes partes de la silla. Se localizaron cinco en el asiento y tres en el

respaldo. El noveno sensor es de distancia, de tipo ultrasónico, y se localizó en la parte de arriba del respaldo.

Esta información irá al microcontrolador, que, usando un módulo Bluetooth, la mandará a un ordenador. En el ordenador tendrá lugar la clasificación de la postura, en buena o mala. Una vez se ha clasificado, se vuelve a conectar con el microcontrolador, usando el mismo módulo Bluetooth. Si la postura se clasificó como mala, se activarán cuatro motores de vibración situados en el asiento, para avisar al usuario de que su postura es mala. Adicionalmente, se mostrará en el ordenador una *interfaz gráfica de usuario* (GUI), en la cual el usuario podrá ver un mapa de calor de su postura.

El autor de esta memoria tuvo entre sus responsabilidades encargarse de la alimentación del sistema, que incluía adaptar la tensión a las alimentaciones de los diferentes módulos, la obtención de la postura mediante los sensores, y los motores que avisan al usuario.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se realizó el proyecto siguiendo los plazos previstos. El sistema fue probado por varias personas diferentes y se comprobó que funcionaba correctamente.



Figura 2. Vista frontal del sistema.

El objetivo principal, que se lograra una clasificación precisa de las posturas, se consiguió. Si bien la calidad y cantidad de los sensores usados no permitía una

clasificación muy estricta y precisa, se consiguió que las posturas que eran claramente dañinas para el usuario fueran detectadas por el sistema.

El objetivo de hacer un sistema no intrusivo fue conseguido únicamente en parte. Si bien la clasificación de posturas fue conservadora, de vez en cuando se producían activaciones repentinas de los motores cuando esto no debía ocurrir, lo cual puede ser irritante para el usuario. Por otro lado, el hecho de no haber tenido en cuenta la variable temporal (no es lo mismo permanecer en una mala postura por cinco segundos que por cinco minutos), hace que el sistema reacciones de inmediato a una mala postura, lo cual puede ser molesto si, por ejemplo, el usuario se agacha para recoger un objeto que se le ha caído.

Si bien el proyecto no fue barato, se cree que se logró una buena calidad-precio, pues no se hubiera conseguido la calidad de clasificación si, por ejemplo, se hubieran usado unos sensores peores.

En conclusión, se realizó un proyecto novedoso que puede significar un primer paso de lo que sería una nueva forma de solucionar el dolor de espalda. Si bien esto no deja de ser un proyecto universitario, se cree que, si se realizan algunas mejoras, este producto podría ser de utilidad real para la gente y tener un futuro comercial. Así, se conseguiría el objetivo de todo ingeniero: desarrollar ideas novedosas para mejorar la tecnología existente y así, mejorar la vida de la gente.

POSTURE GUIDANCE CHAIR

Author: Pablo Corral Vila
Director: Kexin Hui
Collaborating organization: ICAI – Universidad Pontificia Comillas
University of Illinois

PROJECT SUMMARY

INTRODUCTION

The scientific and technologic research that has been conducted during the last years has helped to improve people's health, because medicine has improved. One of the new tendencies is preventive medicine, which focuses on avoiding health issues, instead of waiting for them.

A problem that can be solved using preventive medicine is back pain. According to the American Chiropractic Association, most cases have mechanical or non-organic origin. This means that they are not caused by serious injuries or diseases. One of the leading causes of back pain is bad posture while sitting. The solution that will be developed in this project is trying to prevent bad posture, so the probability of back pain happening decreases.

OBJECTIVES

The objective of this project is using a chair. Some electronic systems will be added to it and they will detect the user's posture and warn him or her if that posture is bad, so he or she can change it. To warn the user, vibration motors will be allocated on the seat. To achieve this, the main goal is accuracy, because if the system is not accurate and the vibration motors activate or deactivate when they should not, the project would fail.

It was also tried that the posture classification was not very strict, but conservative, so, if the posture is medium, the system will take it as a good posture. This was done looking for a non-intrusive system. The team does not want the system to activate or deactivate the motors every time the user does a small movement. Other objectives concerned the power consumed by the system, which the team tried to decrease as much as possible,

because the less power the system consumes, the more the battery that supplies power to the system lasts. Finally, the team must reach these objectives at a reasonable cost.

METHODOLOGY

This project was done at the University of Illinois. Some communications were made with Universidad Pontificia Comillas. It was done in a team of three people.

Now, the way the system works will be explained and the components that the author of this memory worked on will be indicated. In the memory, more detailed descriptions may be found, as well as the design decisions that were made.

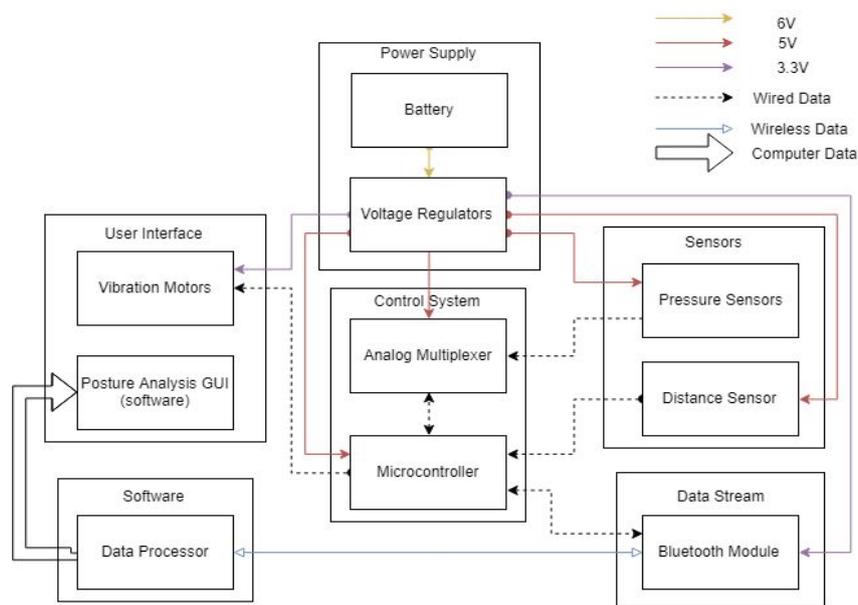


Figure 1. Block diagram of the system.

This block diagram describes, in a schematic way, the way the system works. The different modules of the system need to be supplied at 5V or 3.3V. To supply all of them, a 6V battery was used and this voltage was adapted to the different modules, using voltage regulators.

To get information about the user's posture, nine sensors were used, divided into two types. On the one hand, eight resistive pressure sensors were used, so information about the force with which the user sits on the different parts of the chair. Five of these sensors were allocated on the seat and three were allocated at the back of the chair. The ninth sensor is an ultrasonic distance sensor, which was allocated at the upper side of the back.

This information will go to a microcontroller, which, using a Bluetooth module, will send it to a computer. In this computer, the posture classification will be made. Once the

posture has been classified, the computer will connect again with the microcontroller, using the same Bluetooth module. If the posture was classified as bad, four vibration motors, allocated on the seat, will be activated, in order to warn the user that his or her posture is bad. Moreover, a graphical user interface (GUI) will be showed to the user, who will be able to see a heat map of his or her posture.

The author of this memory had the responsibility of developing the power supply module of the system, which including adapting the voltage to the different modules. He also had the responsibility of developing the modules needed to get the posture from the user, using the sensors, and finally, the vibration motors that warn the user.

RESULTS AND CONCLUSION

The project was done following the scheduled timetable. It was tried by different people and it was checked that it worked properly.



Figure 2. System's front view.

The main objective, getting an accurate classification, was achieved. Although the quality and quantity of the sensors that were used did not allow a very strict and accurate classification, the system would detect postures that are clearly harmful for the user.

The objective of doing a non-intrusive system was not totally reached. Even though the posture classification was conservative, sometimes the motors were activated when they should not, and it can be annoying for the user. Furthermore, the time the user has been

sitting using a specific posture was not used when doing the classification (it is not the same using a specific posture for five seconds than for five minutes). This leads the system reacting to a bad posture instantaneously. For example, if a user's object falls on the ground and he or she bends to get it, the system will probably take this situation as a bad posture situation.

Even though the project was not cheap, the team believes that it was made with a good quality-cost relationship. The good classification accuracy would not have been reached with worse sensors.

In conclusion, this was an original project that may be the first step of a new way to solve back pain. Although this is not more than a university project, the team believes that, if some improvements are done, this product could have a real utility for the people and have a commercial future. If so, the objective that every engineer has would be achieved, developing new ideas to improve existent technology and so, improving people's lives.



Índice de la memoria

<i>Capítulo 1</i>	<i>Introducción</i>	7
1.1	Estado del arte	8
1.2	Motivación del proyecto	10
1.3	Objetivos	11
1.4	Metodología	12
1.5	Recursos empleados	15
<i>Capítulo 2</i>	<i>Alimentación del sistema</i>	17
2.1	Diseño	17
2.2	Simulación	21
2.3	Prueba y verificaciones	25
<i>Capítulo 3</i>	<i>Sensores de presión</i>	29
3.1	Diseño	29
3.2	Prueba y verificaciones	34
<i>Capítulo 4</i>	<i>Sensor de distancia</i>	37
4.1	Diseño	37
4.2	Prueba y verificaciones	38
<i>Capítulo 5</i>	<i>Motores de vibración</i>	41
5.1	Diseño	41
5.2	Simulación	43
5.3	Prueba y verificaciones	46



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

ÍNDICE DE LA MEMORIA

<i>Capítulo 6</i>	<i>Análisis de costes</i>	<i>49</i>
<i>Capítulo 7</i>	<i>Seguridad y ética.....</i>	<i>51</i>
<i>Capítulo 8</i>	<i>Conclusiones.....</i>	<i>55</i>
<i>Capítulo 9</i>	<i>Futuros desarrollos</i>	<i>59</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>.....</i>	<i>62</i>



Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.....	12
Figura 2. Esquema de un regulador de tensión básico.	18
Figura 3. Esquema de un regulador de tensión con transistor.....	19
Figura 4. Reacción de la tensión de salida a ruido en la tensión de entrada (regulador de 3.3V).....	22
Figura 5. Reacción de la tensión de salida a caída en la tensión de entrada (regulador de 3.3V).....	23
Figura 6. Reacción de la tensión de salida a ruido en la tensión de entrada (regulador de 5V).....	24
Figura 7. Reacción de la tensión de salida a caída en la tensión de entrada (regulador de 5V).....	25
Figura 8. Esquema de un sensor de presión usando una célula de carga.	29
Figura 9. Resistencia sensible a fuerza.....	30
Figura 10. Curva fuerza-resistencia de una FSR.....	31
Figura 11. Circuito comparador.	32
Figura 12. Sensor ultrasónico HC-SR04.	37
Figura 13. Gráfica temporal del sensor ultrasónico.	38
Figura 14. Esquema del problema angular del sensor ultrasónico.....	39
Figura 15. Esquema de implantación de un motor de vibración.	41
Figura 16. Intensidad a través del motor de vibración sin diodo rectificador.	44
Figura 17. Tensión del motor de vibración sin diodo rectificador.	44



Figura 18. Tensión del motor de vibración con diodo rectificador.	45
Figura 19. Intensidad a través del diodo rectificador.	46
Figura 20. Vista trasera de la silla.	51
Figura 21. Vista delantera de la silla.	52
Figura 22. Análisis de componentes principales.	58



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Introducción



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Vivimos en una época donde los problemas de salud, y cómo ponerles solución, son un tema cada vez más importante. El avance científico y tecnológico nos ha llevado a una calidad de vida mucho más alta que en épocas anteriores.

Esto es, entre otras cosas, fruto del avance de la medicina. Muchas enfermedades, algunas potencialmente mortales, se han erradicado. Otras se han logrado controlar en la medida de lo posible actualmente.

Un campo específico que ha cobrado mayor importancia en los últimos años es la medicina preventiva. Si la medicina tradicional era reactiva (reacciona a un problema que ha surgido), la medicina preventiva busca anticipar el problema, esto es, impedir que ocurra o reducir las posibilidades de ello [1].

De todos los problemas de salud, el dolor de espalda es un problema cada vez más tratado. Según la Asociación Quiropráctica Americana, 31 millones de estadounidenses sufren de dolor de espalda de forma permanente [2]. Si se extrapola este número a todo el mundo, resultaría en que casi el 10% de la población mundial sufriría de dolor de espalda. Además, los expertos de esta organización aseguran que el 80% de la población mundial sufrirá dolor de espalda en algún momento de sus vidas.

La mayoría de los casos de dolor de espalda no provienen de lesiones o enfermedades graves. Al contrario, la mayoría provienen de factores simples que, acumuladas, pueden dar lugar al dolor de espalda, como una mala dieta, una mala postura al dormir, una mala postura al sentarse, tener un peso por encima de lo ideal, someterse a esfuerzos prolongados...

En este proyecto, se ha intentado prevenir una de estas causas: la mala postura al sentarse. Este proyecto es un proyecto en grupo realizado en la Universidad de Illinois, con otros dos alumnos locales. Al hilo de lo que está intentando la medicina moderna, lo que se intenta es corregir la postura para evitar que el dolor de espalda tenga lugar.



La idea consiste en una silla que vibrará en cuanto detecte que el usuario tiene una mala postura. La postura será detectada mediante sensores: ocho sensores de presión, localizados en el asiento y en el respaldo, y un sensor de distancia, localizado en la parte de arriba del respaldo.

Los valores de los sensores se mandarán, usando Bluetooth, a un ordenador, donde tendrá lugar la fase de análisis del proyecto. En esta fase, usando *machine learning*, las lecturas de los sensores se calificarán como *buena postura* o *mala postura*. Si la decisión es *mala postura*, se activarán cuatro motores de vibración localizados en el asiento, que avisarán al usuario de que su postura es mala y debería cambiarla. Además, un mapa de calor con los valores de los diferentes sensores se mostrará al usuario.

Durante esta memoria, sólo se explicarán con detalle los aspectos relacionados con el autor de ésta. Esto incluye: la alimentación del sistema (batería y adaptación a diferentes tensiones), la obtención de información de la postura (mediante los sensores) y la interacción del sistema con el usuario (motores). Con más brevedad se explicarán el resto de módulos, pues será útil para contextualizar el proyecto.

1.1 ESTADO DEL ARTE

Como se ha explicado, la medicina tradicional va dejando paso a la medicina preventiva. En cuanto al problema que nos ocupa, ya han aparecido algunos trabajos similares al que se ha desarrollado en este proyecto.

Este proyecto es, principalmente, electrónico. La forma en la se obtiene la información, y la forma con la que se interactúa con el usuario, es principalmente electrónica. La forma con la que se analiza la postura es informática y matemática. Ya existen sillas enfocadas a provocar una buena postura. Sin embargo, la tendencia general es apostar por la ergonomía, y no por la electrónica. Empresas como Ikea, John Lewis o Wellworking comercializan sillas ergonómicas, con este propósito [3].



Esto coincide con este proyecto en el problema que se quiere solucionar, el dolor de espalda, y en la idea de usar una silla. No obstante, la metodología es totalmente diferente.

Si se buscan proyectos cuyo método sea la electrónica, no se encuentra ninguno que se corresponda con lo que se ha realizado en este proyecto. El proyecto más similar encontrado fue realizado en la Universidad Nueva de Lisboa [4]. Los autores de este proyecto también usaron ocho sensores de presión, localizando cuatro en el asiento y cuatro en el respaldo. No usaron ningún sensor de distancia. Lo que los autores hicieron fue clasificar la postura en uno de los once tipos de postura que consideraron, usando redes neuronales. El 70% de las clasificaciones realizadas fueron correctas. Cuando el número de tipos de postura considerados se redujeron de once a ocho, este número se mejoró hasta 93.4%.

Este proyecto guarda muchas más similitudes con el aquí presentado que los que hay comercializados, pues ya no sólo se asemejan en el hecho de usar una silla y en la voluntad de intentar solucionar el problema de la mala postura, sino en el método, que es la detección de postura mediante sensores y su posterior análisis.

No obstante, el proyecto aquí presentado también tiene diferencias que lo hacen único. La principal es que, mientras que en el proyecto de la Universidad Nueva de Lisboa se obtiene la información, se analiza, y se muestra al usuario; el proyecto aquí presentado no sólo hace eso, sino que también actúa para avisar directamente al usuario. Es verdad que, al mostrar la información al usuario en forma de mapa de calor, ya se está avisando al usuario de qué tipo de postura está manteniendo en un momento dado. Pero también es verdad que, si bien se puede mirar un mapa de calor en un momento dado, el usuario promedio de una silla no está permanentemente atento a un mapa de calor que se le pueda dar, pues puede estar ocupado con otras cosas.

La idea de no sólo usar una *interfaz gráfica de usuario* (GUI), sino también motores de vibración, soluciona este problema. Si la postura es mala, el usuario se enterará, aunque no esté atento al GUI.



Otras diferencias radican en el hecho de que, como se detallará más adelante, en este proyecto se colocaron cinco sensores de presión en el asiento y sólo tres en el respaldo. Además, se usó también un sensor de distancia, con lo cual, presumiblemente, la información que se puede obtener en nuestro proyecto tiene un punto más de calidad que la del proyecto de la Universidad Nueva de Lisboa.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Hay varios motivos por los cuales se decidió hacer este proyecto. El proyecto se realizó en el seno de la Universidad de Illinois. Los encargados de proponer ideas eran los propios equipos de trabajo. Estas ideas debían ser aprobadas por los profesores de la asignatura.

Uno de los motivos principales por los cuales se decidió seguir adelante con la silla de guía de postura es la utilidad de esta. Como se indicó en el capítulo 1.1, la silla de guía de postura, tal y como se planteó en este proyecto, nunca se había realizado. Si bien el resultado final no es algo digno de ser comercializado todavía (faltarían muchas cosas que pulir y mejorar), sí se creyó que era un avance bueno para el futuro.

Otro motivo fue el carácter multidisciplinar del proyecto. Dos de los miembros del equipo, estudiantes locales en la Universidad de Illinois, pertenecían al *major* de *Computer engineering*, más enfocado a informática. Ellos tuvieron más participación en lo concerniente a programación y *machine learning*.

Por otro lado, el autor de esta memoria fue un alumno de la Universidad Pontificia Comillas (ICAI), que durante su año de intercambio en la Universidad de Illinois perteneció al *major* de *Electrical engineering*. Las diferentes formaciones de los miembros, así como el análisis de sus puntos fuertes y débiles, provocó que se buscara un proyecto donde todos pudieran aportar al proyecto por sí mismos, y no dependieran de la ayuda de nadie. La silla de guía de postura tiene partes analógicas, como la alimentación, los sensores, o los motores. Así mismo, también tiene partes más informáticas o matemáticas. Esto permitió dividir la carga de trabajo.



Otro de los motivos por los que se realizó este proyecto, es que es un proyecto “tangible”. Es decir, no sólo trata de diseño y simulación, sino que se construyó un prototipo del sistema, y se comprobó que el diseño en el que se había trabajado funcionaba en la realidad.

En conclusión, el equipo de trabajo decidió apostar por esta idea porque se pensó que era un proyecto que, además de tener una dificultad razonable, era original, tangible y multidisciplinar.

1.3 OBJETIVOS

Se pusieron una serie de objetivos genéricos para el proyecto, además de algunos objetivos específicos para cada módulo.

El primer objetivo es que el sistema realice la tarea para la cual está desarrollado con fiabilidad y precisión, es decir, que clasifique bien las posturas. Este objetivo se intentará cumplir en la medida de lo posible, pues, al tener sólo nueve sensores, y siendo éstos de precisión limitada, no se pudo conseguir una clasificación muy precisa.

El segundo objetivo tiene que ver con la comodidad del usuario. Se desea una silla no intrusiva, es decir, que no moleste, ni al usuario ni a las personas de alrededor. Las personas de alrededor sólo podrían ser molestadas por el ruido de los motores, pero tras probar el sistema, se comprobó que el propio cuerpo del usuario amortiguaba el ruido. Para que no moleste al usuario, se desea que no ocurran falsos positivos. Ante la duda de una postura “intermedia”, el sistema no debe activar los motores de vibración.

El tercer objetivo tiene que ver con los costes. Aunque este modelo es un prototipo desarrollado en un proyecto universitario, se trabajó en él con el deseo y la creencia de que, en el futuro, si se desarrolla convenientemente, podría ser una solución comercial válida para el problema que se intenta solucionar. Por ello, interesa abaratar costes. La Universidad de Illinois proporcionó 50 dólares americanos para los gastos del proyecto. También proporcionó PCBs gratuitamente, así como

componentes electrónicos básicos (como transistores, diodos, resistencias o condensadores).

El equipo aumentó el presupuesto a 110 dólares americanos para conseguir sensores de mayor calidad, pues se consideró que con el presupuesto original no se podían obtener componentes de calidad suficiente para cumplir con los objetivos del proyecto.

Por último, también se desea eficiencia. Una de las primeras decisiones de diseño tomadas fue que el sistema no iría conectado a la red eléctrica, si no que usaría una batería, para que el usuario pueda mover la silla y no dependa de que haya tomas de corriente. Se desea conseguir una autonomía de, al menos, 20 horas antes de que la batería se acabe. Por ello, se tendrá en cuenta la potencia de los diferentes componentes y se intentará diseñar los diferentes módulos para que sean lo más eficientes posible.

1.4 METODOLOGÍA

En este apartado se explica el funcionamiento del sistema completo, incluidas las partes desarrolladas por otros miembros del equipo.

Posteriormente, se darán explicaciones detalladas sobre las partes desarrolladas por el autor de esta memoria, así como datos sobre simulaciones, pruebas...

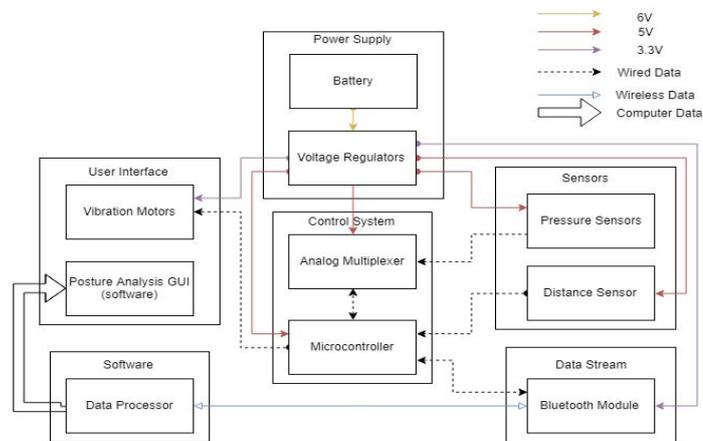


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema.



El sistema se alimenta mediante una batería de 6V. Esta batería consiste en cuatro pilas AA conectadas en serie, para lo que se usó un adaptador. Se eligió esta tensión porque los diferentes componentes del proyecto tienen tensiones de alimentación de 5 ó 3.3V, con lo cual se puede usar una batería de tensión mayor, si se complementa con reguladores de tensión.

En concreto, se realizó dos reguladores de tensión, uno para 5V, y otro para 3.3V. La forma más fácil de hacer un regulador de tensión es usar un diodo Zener, aprovechándose de que estos diodos mantienen una tensión inversa casi constante, cuando están en modo regulación. No obstante, al ser uno de nuestros objetivos la eficiencia, usamos un modelo algo más complejo, que incluye un transistor. Este modelo es más estable. Con la batería y los reguladores de tensión, todos los componentes del proyecto pueden ser alimentados correctamente (exceptuando el ordenador, que va aparte).

Los sensores de presión constituyen una de las partes que va alimentada a 5V. Se decidió comprar resistencias sensibles a fuerza (FSR). Estos sensores, tal como su nombre indica, son una resistencia que varía linealmente con la fuerza que soportan. Si no se aplica ninguna fuerza, la resistencia es tan alta que la podemos considerar infinita. A medida que se aplica presión, la resistencia va bajando. Esto no permite una gran precisión, pero, al ser una resistencia que varía desde el infinito hasta unos pocos ohmios, nos permite obtener una gran resolución. La variación de resistencia se tradujo a variación de tensión cuando se hizo un divisor resistivo con una resistencia fija de 1k.

Esas tensiones (ocho tensiones en total, una para cada sensor), son los valores que se desea mandar al ordenador para que lo analicen. Para mandarlas, se usó un módulo Bluetooth, controlado con un microcontrolador. Como microcontrolador, se usó el ATmega328P, que se programó usando Arduino. Al ser las salidas de los divisores resistivos una tensión analógica, necesitamos conversores analógico-digital (ADC). No obstante, el microcontrolador no tiene ocho ADCs.

Para solucionar este problema, se usó un multiplexor analógico de ocho entradas y una salida. Se controló usando tres bits proporcionados por el propio



microcontrolador, con los cuales se elige cuál de las entradas es la salida. Así, el microcontrolador puede “elegir” cuál de los sensores de presión comprobar.

El otro tipo de sensor es el de distancia. Este sensor es ultrasónico. Cuando recibe la orden del microcontrolador, manda una onda ultrasónica y capta el eco de esta onda. Después, calcula el tiempo que ha pasado entre que envió la onda y que recibió el eco, y devuelve, como salida, un impulso proporcional a este tiempo. Usando el microcontrolador, este impulso se puede “traducir” a distancia, que es el valor que nos interesa.

Una vez el microcontrolador tiene todas las lecturas de los sensores y ha hecho los cálculos oportunos, usa el módulo Bluetooth para mandar las lecturas al ordenador. Se usó el ordenador personal de uno de los miembros del equipo (un portátil normal con Windows). En este ordenador es donde tiene lugar la parte de *machine learning*, en la cual la postura se clasifica la postura como buena o mala. El *training set* que se usó constó de 134 malas posturas y 51 buenas posturas. Como algoritmo, se usó el de *máquinas de soporte vectorial*.

Una vez el sistema ha clasificado la postura, usando el módulo Bluetooth, manda un bit que indica la decisión del sistema. Si el bit que el microcontrolador recibe indica mala postura, pondrá en marcha los motores de vibración, que avisarán al usuario de que su postura es mala.

Además, también se tuvo una interfaz en el propio ordenador, donde se muestra un mapa de calor de todos los sensores.

En cuanto al método de trabajo, se usó un método mixto. Esto quiere decir que, en ocasiones, el equipo trabajó de manera conjunta. Esto ocurrió, principalmente, con la documentación que hubo que presentar, así como en la fase de montaje. En otras ocasiones, la mayoría, cada miembro trabajó individualmente, en las partes del proyecto que se le habían asignado previamente.

El equipo trabajó en solitario, pero se mantuvieron pequeñas reuniones semanales con nuestra *teaching assistant*. En estas reuniones, ella revisaba el avance del proyecto, tanto el avance colectivo como el progreso individual que cada miembro



del grupo había hecho. También revisaba los cuadernos de los miembros y respondía a las preguntas del equipo.

El laboratorio permanecía abierto durante toda la semana, con lo cual cada miembro podía gestionar su propio tiempo, siempre y cuando cumpliera con los objetivos asignados.

1.5 RECURSOS EMPLEADOS

Para realizar este proyecto, se usaron los recursos que la Universidad de Illinois nos procuró. Se tomó una silla del laboratorio prestada, que fue la base de todo nuestro sistema. La Universidad nos procuró elementos electrónicos básicos, como resistencias, diodos o transistores, y al inicio del proyecto, recibimos un *kit* que incluía una *protoboard*, un multímetro, una fuente de tensión portátil y varios cables.

Además, proporcionó un presupuesto de 50 dólares, que se amplió a 110 dólares, pues se quedaba corto para los componentes que se deseaba comprar.

En un proyecto como este, una herramienta importante es la simulación. Aunque se fue cuidadoso con el diseño del sistema, siempre es recomendable usar simulaciones para comprobar que el diseño es válido, así como para corregir posibles errores. En el caso personal del autor de esta memoria, se usó una extensión de MATLAB, Simscape [5], para simular circuitos electrónicos.

Para probar los diferentes circuitos, se usó la *protoboard* proporcionada por la Universidad, para validarlos antes de soldarlos a la PCB. Para soldarlos, se usó soldadura de estaño, que también se usó para unir cables entre sí. Para pegar sensores, motores, o la PCB a la silla, se usó cinta aislante.

Además de la fuente de tensión portátil y el multímetro portátil, en el laboratorio se dispuso de más fuentes de tensión o multímetros, fijas. En menor medida, se usó el osciloscopio.



A continuación, se resumen los componentes utilizados en el proyecto.

- Batería
 - 4x Pila AA
 - Adaptador para conectar cuatro pilas AA en serie
- Reguladores de tensión
 - 2x Transistor de unión bipolar, NPN: MPSU06
 - Diodo Zener: 1N5228
 - Diodo Zener: 1N5232
 - Resistencias: 100 Ω y 18 Ω
- Sensores de presión
 - 8x Sensor de presión resistivo: SEN-09376
 - 8x Resistencia: 1k
- Sensor de distancia
 - Sensor ultrasónico HC-SR04
- Microcontrolador
 - ATmega328P (programado con Arduino)
- Multiplexor analógico
 - Multiplexor analógico 8-to-1: 74HC4051
- Bluetooth
 - Módulo Bluetooth HC-05
- Motores de vibración
 - 4x Motor de vibración: C1034B018F
 - 4x Diodo: 1N4001
 - 4x Transistor de unión bipolar, NPN: MPSU06
 - 4x Resistencia: 1k



Capítulo 2 ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

La mayoría de los componentes del sistema (todos menos el ordenador donde se realiza la clasificación de las posturas y el GUI) están alimentados por una batería. Sobre esta batería no se tuvo que tomar ninguna decisión de diseño relevante, más allá de elegir la propia batería.

Hay dos tipos de módulos en el sistema: los hay que funcionan a 5V o que funcionan a 3.3V. Ya que no hay una sola tensión, se puede usar una de estas dos opciones:

- Usar dos baterías diferentes para alimentar el sistema
- Usar una batería de tensión igual o superior a la máxima y regularla

Se decidió usar una sola batería y regularla. Para hacer un regulador de tensión, se precisa que la tensión de entrada sea mayor que la de salida, y se recomienda que haya una pequeña diferencia entre ambas.

También se decidió que sería conveniente usar pilas alcalinas AA para la alimentación de este sistema. Cada pila AA tiene una tensión de 1.5V, con lo cual la batería final, al conectar las pilas AA en serie, tendrá una tensión múltiplo de 1.5. Se decidió usar una tensión de 6V, porque es una tensión superior a la máxima, y se consideró que al haber una diferencia de 1V entre la tensión de la batería y la tensión de salida más alta de los reguladores, funcionaría correctamente.

Ya que se tienen 6V disponibles y se desea obtener, por separado, 5V y 3.3V, se diseñaron dos reguladores de tensión.

2.1 DISEÑO

Un regulador de tensión es un dispositivo que recibe una tensión de entrada y da una tensión de salida más baja. La propiedad principal de este dispositivo, y el motivo por el que son tan utilizados, es el hecho de que la tensión de salida es fija (siempre que la tensión de entrada esté dentro de unos límites razonables). Esto es



muy útil por si la batería pierde tensión con el paso del tiempo: el regulador funcionará también con esa nueva tensión de entrada.

Para hacer un regulador, se suele aprovechar las propiedades del diodo Zener. Este diodo tiene la propiedad de que cuando conduce en sentido inverso (lo que se conoce como *modo regulación*), la tensión de polarización inversa es prácticamente constante [6].

Usando estas propiedades, el circuito más fácil de implementar es el que usa, simplemente, un diodo Zener y una resistencia.

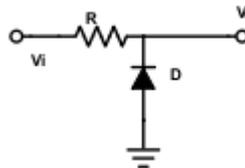


Figura 2. Esquema de un regulador de tensión básico.

Para elegir el diodo Zener, se tiene que buscar uno cuya tensión nominal en modo regulación sea la tensión de salida que se desea obtener.

Para elegir la resistencia, se ha de calcular la resistencia necesaria para la intensidad nominal del diodo Zener y la intensidad de salida. La intensidad, al igual que la tensión nominal, se puede obtener de la *datasheet* del diodo. Para la intensidad de salida, se ha de tener en cuenta qué intensidad tomarán los componentes que se alimentarán a través de ese regulador.

Si la intensidad a través del diodo Zener es I_D , y la intensidad de salida es I_o , usando leyes básicas de electricidad, la resistencia se calcularía mediante la fórmula:

$$R = \frac{V_i - V_o}{I_D + I_o}$$

Ecuación 1. Cálculo de resistencia en un regulador de tensión simple.

Ya que uno de los objetivos de este proyecto es la eficiencia, se calculó la potencia disipada. En un caso ideal, toda la potencia que entra iría a la salida, pero también hay potencia que se disipa en el diodo y en la resistencia.

$$P_{disipada} = P_o - P_i = V_o I_o - V_i (I_D + I_o)$$

Ecuación 2. Potencia disipada en un regulador de tensión simple.

La resta entre la potencia de salida y la potencia de entrada es la potencia que se consume entre ambas.

Ahora bien, este circuito es el más básico para hacer un regulador de tensión, pero existen reguladores más sofisticados. Si se quiere ir un nivel más allá en cuanto a la complicación del regulador, se puede añadir un transistor de unión bipolar (BJT) [7].

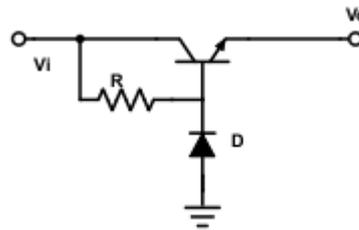


Figura 3. Esquema de un regulador de tensión con transistor.

En este caso, la tensión del diodo Zener no se corresponde con la de salida, sino que hay que tener en cuenta la tensión entre emisor y base del transistor. Así, si la tensión entre emisor y base es V_{BE} , se elegirá un diodo Zener con una tensión nominal:

$$V_D = V_o + V_{BE}$$

Ecuación 3. Tensión Zener adecuada para un regulador de tensión con transistor.

La característica principal del BJT es que, en modo activo, existe una proporcionalidad entre las intensidades de base y colector. A la constante de proporción se le suele llamar β [8].

Para calcular el valor de la resistencia R, y teniendo en cuenta que las tensiones a ambos lados de la resistencia son conocidas (V_i y V_D), lo que se precisa es saber la intensidad que pasa a través de ella. Esta intensidad, a la que se le dará el nombre de I_R , es la suma de la intensidad nominal del diodo (I_D) y la intensidad de la base del transistor (I_B).



Si la intensidad del colector (I_C) es β veces la de la base, y la intensidad del emisor (I_E) es la suma de las intensidades de base y colector:

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = (\beta + 1)I_B$$

Ecuación 4. Relación entre las intensidades de base y colector en un transistor de unión bipolar.

Teniendo en cuenta que el emisor del transistor es la salida del regulador, y por tanto la entrada de los siguientes módulos, esta tensión es conocida, y se puede llamar I_o . Gracias a la ecuación antes hallada, y conociendo los valores nominales del diodo, la β nominal del transistor y la intensidad de salida, se puede calcular R:

$$R = \frac{V_i - V_D}{I_D + \frac{I_o}{\beta + 1}}$$

Ecuación 5. Cálculo de resistencia en un regulador de tensión con transistor.

Para calcular la potencia disipada, se hará balance de potencias:

$$P_{disipada} = V_o I_o - V_i \left(\frac{\beta}{\beta + 1} I_o + I_D + \frac{1}{\beta + 1} I_o \right) = V_o I_o - V_i (I_D + I_o)$$

Ecuación 6. Potencia disipada en un regulador de tensión con transistor.

Como se puede observar, la mayor complejidad del circuito, con la inclusión del BJT, no ha resultado en mayor disipación de potencia. La potencia disipada en el regulador sigue siendo la misma.

Ya que no hay ahorro de potencia, la pregunta es qué ventaja hay de usar el segundo diseño. La respuesta a esta pregunta tiene que ver con la estabilidad del regulador.

Como ya se ha explicado, la característica principal de estos dispositivos es que la tensión de salida no es proporcional a la de entrada (aunque sí se requiere que esté dentro de unos márgenes).

Al usar el transistor, si se produce un cambio en la intensidad de salida, la intensidad de la base del transistor también cambiará, pero cambiará sólo β veces menos. El que la corriente de base cambie poco se traduce a que la corriente del diodo Zener también, con lo cual es más fácil que el diodo se mantenga en las condiciones de operación.



En este caso concreto, la referencia no va a variar. La carga sí variará, pero no en exceso (variará según los sensores y motores se activen o no, por ejemplo). Se decidió usar el segundo diseño, más completo y estable.

Se decidió usar el transistor MPSU06. Se trata de un transistor de unión bipolar NPN.

Asumiendo una tensión emisor-base de 0.6V, se deben buscar diodos Zener con tensión inversa de 5.6V (para el regulador de 5V) y de 3.9V (para el regulador de 3.3V). Se eligieron los diodos 1N5232 (con tensión de 5.6V) y 1N5228 (con tensión de 3.9V).

Según la *datasheet* de estos diodos, la relación entre las corrientes a través de colector y base, cuando el diodo trabaja en modo activo, es de 60. Conociendo estos datos, se puede calcular la resistencia que se conectará entre colector y base.

En el caso del regulador de 3.3V, usando la ecuación 5, se calculó una resistencia de 100Ω. En el del regulador de 5V, usando la misma fórmula, se calculó una resistencia de 18Ω.

Por último, se decidió exigir unas características en el regulador, que serían puestas a prueba en la simulación, primero; y en la prueba real, después.

- El regulador de 3.3V debe dar tensiones de salida entre 3 y 3.6V, para tensiones de entrada entre 6 y 5.5V.
- El regulador de 5V debe dar tensiones de salida entre 4.5 y 5.5V, para tensiones de entrada entre 6 y 5.5V.

2.2 SIMULACIÓN

Una vez elegidos un tipo de diseño y unos componentes, se procedió a realizar la simulación. Se hicieron varios tipos de simulaciones:

- Reacción de la tensión de salida a cambio en referencia
- Reacción de la tensión de salida a ruido en referencia

Para realizar la simulación, se debe modelar la carga. Se decidió modelarla de la manera más simple: una resistencia. Para calcular esta resistencia, se tuvo que hallar



la corriente que necesitaban los módulos que irían conectados a cada regulador (incluidos los módulos que fueron diseñados por personas del equipo distintas del autor de la presente memoria, pues los reguladores deben alimentar todo el sistema). Para el regulador de 3.3V, que alimentará el módulo Bluetooth y los motores de vibración, la intensidad es de, aproximadamente, 128mA. Conociendo la tensión de salida del regulador, y usando la Ley de Ohm, se calculó una resistencia de carga de, aproximadamente, 25Ω.

Para el de 5V, que alimentará los sensores, el microcontrolador y el multiplexor analógico, la intensidad es de aproximadamente 120mA. Usando la Ley de Ohm, la resistencia de carga es de 40Ω.

Se observó que, en el regulador de 3.3V, la reacción de la tensión de salida a un escalón de 0 a 6V en la tensión de entrada era, prácticamente, instantánea, lo cual es ideal para el funcionamiento del sistema.

Se observó también que el ruido no suponía un problema. Al haber variaciones en la tensión de entrada, esto se traducía en una variación en la tensión de salida, pero rápidamente se recuperaba hasta la tensión de salida deseada. Al haber ruido constante, esto se traducía en pequeñas variaciones constantes alrededor de la tensión de salida deseada, que no suponían mayor problema.

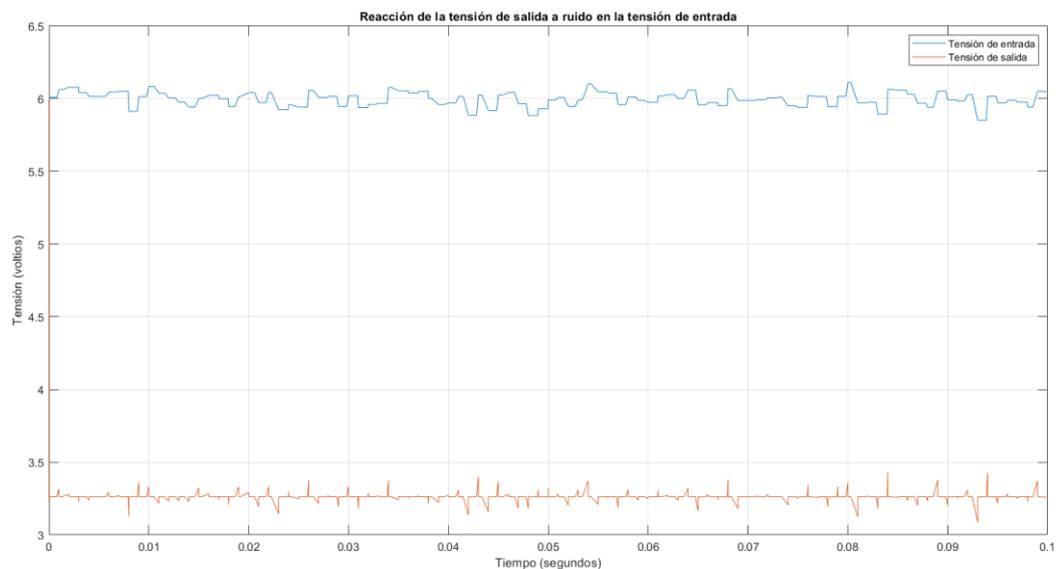


Figura 4. Reacción de la tensión de salida a ruido en la tensión de entrada (regulador de 3.3V).



Se observó también qué ocurriría si la tensión de entrada bajaba de repente de 6V a 5.5V (pérdida de carga de la batería).

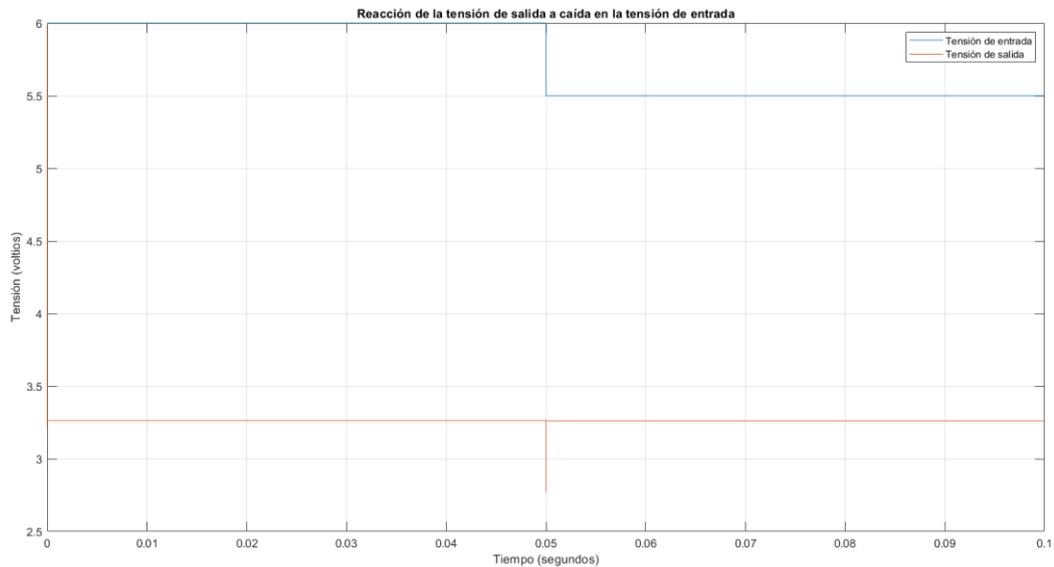


Figura 5. Reacción de la tensión de salida a caída en la tensión de entrada (regulador de 3.3V).

Si se observa la gráfica, se ve que, cuando ocurre la caída en la tensión de entrada, se produce una caída en la tensión de salida. No obstante, la recuperación es tan rápida que es imposible apreciar el tiempo que tarda. Este resultado es bueno, pues nos indica dos cosas:

- Si la tensión de entrada cambia bruscamente, la tensión de salida recuperará su valor ideal muy rápidamente.
- El regulador funciona bien en el rango en el que se desea que funcione (tensiones entre 6 y 5.5V).

Estas pruebas se hicieron también con el regulador de 5V. Al haberlo hecho antes con el de 3.3V, se esperaban resultados similares, pero había una pregunta a la que habría que buscar respuesta.

Se trata de la segunda simulación, en la que se comprueba qué le ocurre a la tensión de salida cuando la de entrada pasa a ser de 5.5V. Como se expuso anteriormente, para que un regulador de tensión funcione correctamente, es ideal que la tensión de entrada no sólo sea mayor que la de salida (condición necesaria), sino que además haya una pequeña diferencia entre ambas. No se tenía la certeza de si esa diferencia de 0.5V entre ambas tensiones sería suficiente para que el regulador funcionara.



Al hacer la simulación del ruido, los resultados fueron los esperados, esto es, unos resultados similares a los del regulador de 3.3V.

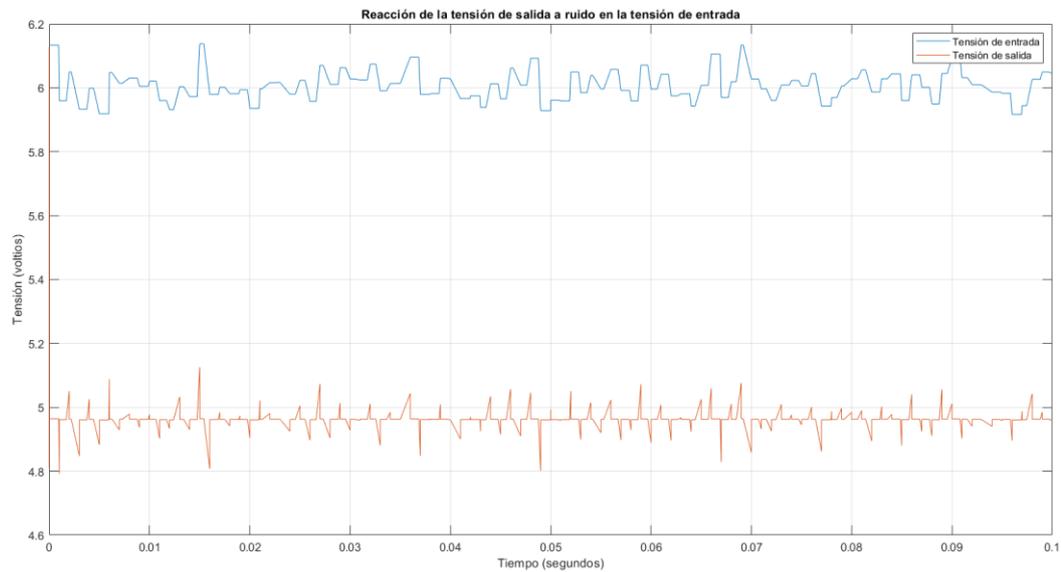


Figura 6. Reacción de la tensión de salida a ruido en la tensión de entrada (regulador de 5V).

Se observa que los resultados son similares a los obtenidos con el regulador de 3.3V. La única diferencia es que el ruido en la salida está menos amortiguado, lo cual es lógico teniendo en cuenta que la tensión de salida es mucho más cercana a la de entrada. Por tanto, este resultado también se consideró satisfactorio.

Por último, se hizo también la simulación de la caída a 5.5V con el regulador de 5V. Como se comentó anteriormente, esta es la simulación que más dudas suscitaba.

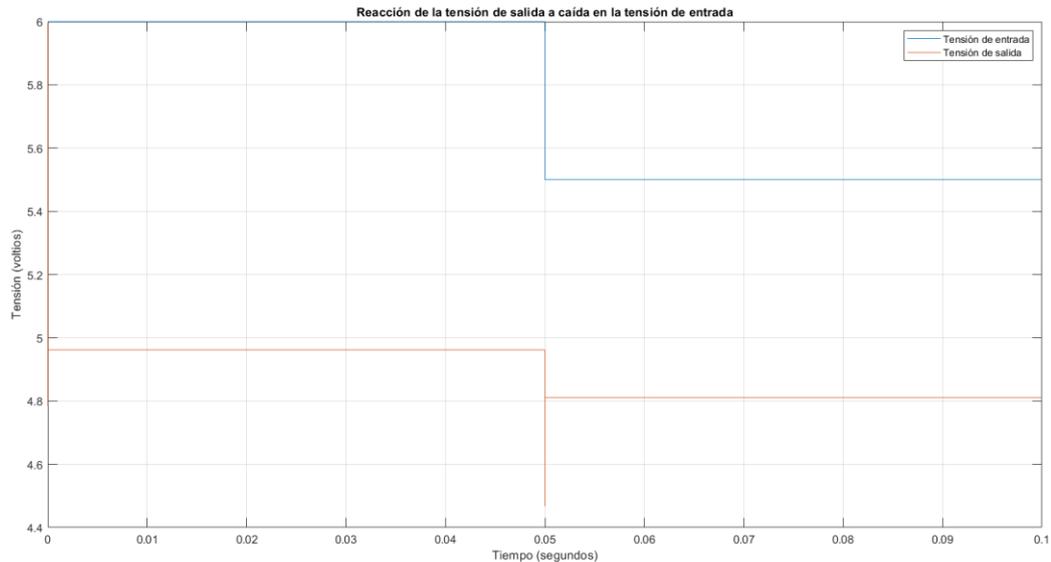


Figura 7. Reacción de la tensión de salida a caída en la tensión de entrada (regulador de 5V).

En este caso sí se observa una diferencia importante con respecto a la simulación realizada en el regulador de 3.3V. Al igual que en dicho regulador, la tensión de salida tiene un sobrepaso y recupera un tiempo ínfimo. Sin embargo, en esta ocasión, al contrario que en el regulador de 3.3V, la recuperación no es total, si no que se queda en aproximadamente 4.8V.

Esto es consecuencia de lo comentado anteriormente: la diferencia de 0.5V entre las tensiones de entrada y salida, una diferencia muy pequeña, provoca que el regulador no sea ideal. No obstante, como se expuso en el capítulo 2.1, este valor entra dentro de los requerimientos.

Por ello, aunque el resultado de esta última simulación no sea ideal, se considera satisfactorio. Con esta simulación, se consideran finalizadas las simulaciones relacionadas con la alimentación y se procede a verificar el funcionamiento en la *protoboard*.

2.3 PRUEBA Y VERIFICACIONES

Una vez realizadas las simulaciones, se prosiguió con la prueba en la *protoboard*. Se tomaron los materiales necesarios de la Universidad y se montaron los dos



circuitos. Para comprobar si los circuitos satisfacían las condiciones requeridas, se usó una fuente de tensión y un voltímetro.

Se tomó nota de los valores que tomaba el regulador cuando la tensión de entrada variaba. También se dejaron los reguladores alimentados durante unos minutos, para comprobar si había algún incidente con la subida de temperatura provocada por la electricidad (el parámetro β de los transistores suele tener variaciones importantes con la temperatura).

Para modelar la carga (ya que no se tenían todavía el resto de módulos), se volvió a usar una resistencia, como ya se hizo en la simulación.

Regulador	Tensión de entrada: 5.5V	Tensión de entrada: 6V
Regulador de 3.3V	3.21V	3.23V
Regulador de 5V	4.75V	4.91V

En esta tabla se muestran los dos supuestos principales para ambos reguladores. Uno de ellos es el supuesto en el que la batería da exactamente la tensión nominal, de 6V. El otro supuesto es cuando la batería pierde tensión, pues se desea que los reguladores sigan funcionando cuando esto ocurra. En concreto, se hizo la comprobación con una tensión de entrada de 5.5V.

Si se comparan los resultados de la prueba real, se ve que son acordes con lo que se había simulado previamente usando Simscape y con los requerimientos que se pusieron al realizar el diseño. A pesar de que los reguladores tienden a dar como salida tensiones un poco más bajas que los valores para las que fueron diseñadas, todas las tensiones están dentro de los límites que se pusieron a la hora de hacer los requerimientos. Por ello, se concluyó que la prueba era satisfactoria.

Al finalizar la prueba, unida a una simulación exitosa, se concluyó que el diseño de los reguladores de tensión era válido. Este diseño se montó, de forma definitiva, en la PCB, y alimentó al resto de componentes.



Este fue el primer módulo en ser simulado, probado y montado, con lo cual fue posible usarlo para probar el resto de módulos, en lugar de usar directamente la fuente de tensión (con la tensión deseada en cada momento, 3.3 ó 5V), pues interesa que las pruebas de los diferentes módulos sean lo más parecidas posibles a lo que será el montaje final.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO INDUSTRIAL

Alimentación del sistema



Capítulo 3 SENSORES DE PRESIÓN

Los sensores de presión constituyen un total de ocho de los nueve sensores que se van a usar en el proyecto, por lo que son el grueso del sistema de detección de postura.

3.1 DISEÑO

La primera decisión a tomar es qué tipo de sensor usar. La primera opción que se consideró fue usar una célula de carga de galgas extensométricas. Esta célula se aprovecha de la propiedad de que, cuando un material conductor sufre un esfuerzo, se deformará, y al deformarse, cambiará su resistencia eléctrica [9].

Esta propiedad puede usarse para medir la fuerza aplicada, siempre que el material no sea sometido a fuerzas que lo lleven por encima de su límite elástico, momento en el cual las deformaciones dejan de ser reversibles.

Esta resistencia variable se puede “traducir” a una tensión variable, mediante un divisor de tensión.

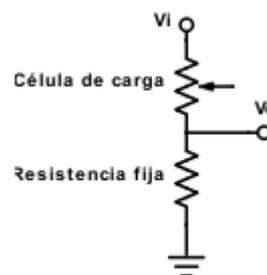


Figura 8. Esquema de un sensor de presión usando una célula de carga.

El problema de este componente es su ínfima variación resistiva. Esta variación resistiva se basa en la elasticidad del material, pero los materiales con los que se hace una célula de carga no son excesivamente elásticos. Un nivel de variación



típico es de aproximadamente una milésima parte de la resistencia que hay cuando el material no sufre ningún esfuerzo. Esta ínfima variación resistiva se traduciría en una ínfima variación de tensión, y así sería muy complicado obtener información de utilidad, a no ser que se hiciera un circuito de amplificación para hacer la variación más notable.

Por ello, se tomó a consideración una segunda idea, más cara. Se trata de la “resistencia sensible a fuerza” (en inglés, FSR, *force-sensing resistor*). Esta resistencia consiste en un polímero conductor, que cambia la resistencia cuando se le aplica una fuerza a la superficie, debido a la *percolación* [10] y al *efecto túnel* [11].

En concreto, se eligió la FSR SEN-09376, de Sparkfun Electronics. Se trata de un sensor cuadrado de aproximadamente 1.75” de lado.

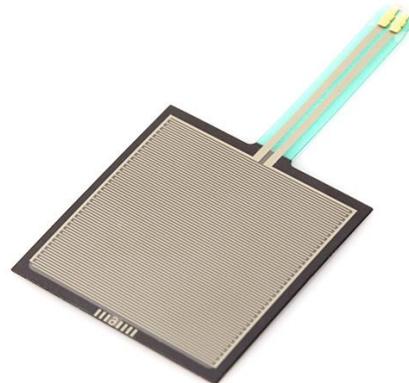


Figura 9. Resistencia sensible a fuerza.

Las ventajas de este componente sobre la célula de carga de galgas extensométricas son las siguientes:

- Mientras que la célula de carga suele ser un material alargado que se somete a una tensión elástica, una FSR suele ser un material plano, con forma de círculo o cuadrado, como una pegatina. Esto hace que sea ideal para colocar en la silla, pues el usuario no notará que está sentado sobre sensores.
- La resistencia tiene una variación mucho más grande, lo cual proporciona una mejor resolución.

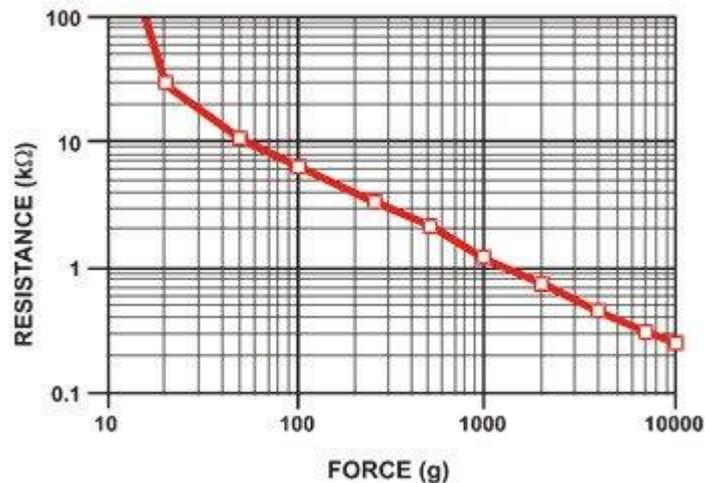


Figura 10. Curva fuerza-resistencia de una FSR.

En esta gráfica, se muestra la variación de la resistencia de esta FSR con la fuerza aplicada. Por conveniencia, tanto la fuerza como la resistencia se muestran en escalas logarítmicas. Acorde a la gráfica, cuando se aplica una fuerza de 100g, la resistencia de la FSR es aproximadamente 7k. Cuando la fuerza se aumenta 10 veces, es decir, 1kg, la resistencia pasa a ser menos de 2k.

No obstante, este componente también tiene desventajas:

- Es más caro que la célula de carga. Teniendo en cuenta que se van a implantar ocho de estos dispositivos, la diferencia de presupuesto final puede ser notable.
- Una precisión muy baja, comparada con la alta precisión de la célula de carga.

Es decir, hay una desventaja económica y una desventaja técnica. Analícese la desventaja técnica.

Es cierto que sería deseable más precisión, pero lo más importante de este componente no es tanto la precisión, como la resolución. La célula de carga da una precisión enorme, pero tiene muy poca resolución, pues la variación de resistencia es muy pequeña, comparada con la resistencia base. Esto obligaría a diseñar un circuito amplificador para medir el pequeño cambio resistivo.

La FSR no tiene una gran precisión, pero presenta grandes variaciones resistivas, incluso cuando la fuerza aplicada es pequeña. Por ello, es ideal para el propósito de este proyecto.

Para implantar la FSR, se puede hacer un circuito similar al planteado para la célula de carga. No obstante, ahora que se ha determinado que se usará la FSR como sensor, se debe plantear cómo mandar la información al microcontrolador.

La forma más simple, que fue la primera que se planteó, fue mandar la información de forma digital. Según el circuito de la figura 8, la tensión de salida es analógica, y puede tomar varios valores dependiendo de la fuerza del sensor. Para pasar de un valor analógico a otro digital, se planteó la idea de usar un amplificador operacional como comparador [12].

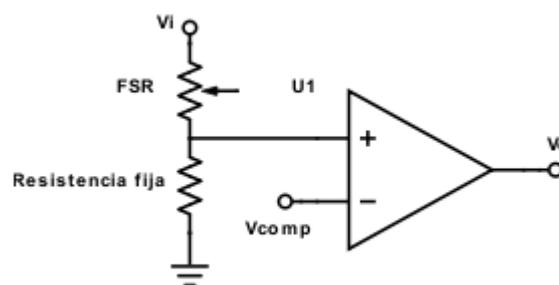


Figura 11. Circuito comparador.

La tensión denominada “ V_{comp} ” es una tensión fija, que debe ser menor que 5V (la tensión de alimentación de este módulo, que proviene del regulador de 5V). Para conseguir esta tensión, se puede hacer un divisor de tensión con resistencias fijas.

Si se alimenta el amplificador operacional entre 5V y tierra, la salida será:

- 5V, si la tensión del terminal positivo del amplificador es mayor que V_{comp} .
- 0V, si la tensión del terminal positivo del amplificador es menor que V_{comp} .

Con lo cual, al haber sólo dos posibilidades, se trata de un sistema binario, donde la salida puede ser 1 ó 0. Estos datos serían transmitidos al microcontrolador mediante un codificador, que reduciría las entradas necesarias del microcontrolador de ocho, necesarias sin codificador, a tres.



Este diseño fue el que primero se comentó al profesorado de Illinois. No obstante, después de que el equipo discutiese y se empezaran a tomar las decisiones para el diseño final, se consideró que un diseño donde cada sensor sólo puede dar uno entre dos valores, era insuficiente para conseguir la calidad de sistema que se deseaba. Además, se consideró que, dada la gran resolución de las FSR, se estaría desaprovechando esta resolución al reducir los posibles valores a sólo dos.

Por ello, este circuito se desechó, y se decidió trabajar con valores analógicos, lo cual confiere al sistema muchas más posibilidades.

Otro aspecto que hay que decidir es la resistencia. Ya que se ha decidido hacer uso de un divisor de tensión, se debe elegir una resistencia que será la que acompañe a la FSR. Para ello, será conveniente conocer cuánta presión estará soportando, en promedio, cada sensor, cuando haya un usuario sentado en la silla.

Si se modelan, tanto el asiento como el respaldo, como cuadrados de 30cm de lado, la superficie total es de 900cm². Ya que el modelo de FSR SEN-09376 tiene forma de cuadrado de 4.45cm de lado, cada FSR tiene una superficie de 19.8cm²

Haciendo la proporción de superficies, se obtiene que cada FSR ocupa, aproximadamente, un 2.2% de la superficie total en la que se encuentra. La fuerza que sufre una superficie cuando es presionada es directamente proporcional al área de la superficie, luego cada FSR soportará un 2.2% del peso del usuario.

Si se toma un valor de 70kg como el peso promedio de un ser humano, se obtiene que cada FSR soportará, en promedio, 1.5kg.

De acuerdo con la gráfica de la figura 10, la resistencia que tiene la FSR cuando se le aplica una fuerza de 1.5kg, es decir, su resistencia promedio, es aproximadamente 1k. Por ello, la resistencia que se usará para completar el divisor de tensión también será de 1k, pues será la que mejor resolución otorgue.

Una vez elegida la resistencia, lo último que solucionar era la forma en la cual se mandarían los datos al microcontrolador. Ya que se decidió usar tensiones analógicas, se debe usar conversor analógico-digital (ADC). Sin embargo, los microcontroladores no suelen tener ocho conversores, y el que se usó en este proyecto, el ATmega328P, no fue una excepción.



Para solucionar este problema, se usó un multiplexor analógico. Este componente recibe ocho entradas y convierte una de esas ocho entradas en la salida. La forma en la que se decide cuál de las entradas se convierte en la salida es con tres bits de selección, con los cuales se pueden conseguir ocho combinaciones diferentes, teniendo cada combinación una entrada asignada.

Se eligió el multiplexor 74HC4051, del fabricante ON Semiconductors.

Con la elección del multiplexor, se dio el diseño por cerrado. Una vez se obtuvieron las ocho FSR, se procedió a la prueba en la *protoboard*, para lo cual se pusieron una serie de requerimientos:

- Cuando no se aplica presión, la salida del divisor de tensión debe ser de 0V, y la corriente de salida, de menos de 0.05mA.
- Si el usuario se sienta en una posición neutral, los sensores de la izquierda y sus equivalentes de la derecha deben dar tensiones con menos de 0.1V de diferencia.
- Las lecturas de los sensores deben ser consistentes en el tiempo (menos de 0.5V de diferencia).

3.2 PRUEBA Y VERIFICACIONES

Para comprobar si el diseño era correcto, se hicieron varias pruebas. En primer lugar, se usó un ohmímetro para ver cómo variaba la FSR con la fuerza.

Cuando se conectaba el ohmímetro a la resistencia, se vio que, si no se presionaba, la lectura del ohmímetro era infinita. Esto fue considerado una buena noticia, pues el primer requerimiento del diseño es que la tensión de salida, cuando no hay presión, sea nula. Si se hace un divisor de tensión entre una resistencia infinita, conectada a la alimentación; y una finita, conectada a la tierra, la salida es nula.

Se comprobó que, efectivamente, había una gran variación cuando se apretaba la resistencia con los dedos. Esta comprobación fue hecha únicamente a modo cualitativo, para ver que todo iba según lo previsto, pues es imposible saber exactamente cuánta fuerza se está aplicando.



Después de la prueba del ohmímetro, se siguió con una prueba del circuito completo, que se cerró exitosamente.

Una vez los sensores se localizaron en la silla, se procedió con las últimas pruebas, comprobando que los diferentes requerimientos eran cumplidos.

También se probó el multiplexor analógico, independientemente de las FSR. Para ello, se fueron cambiando los bits de selección, y así se pudo comprobar que todas las combinaciones de selección posibles funcionaban.





Capítulo 4 SENSOR DE DISTANCIA

El sensor de distancia es el único de los nueve sensores que no es un sensor de presión. Se colocó en la parte de arriba del respaldo, de forma que detecta la distancia que hay entre el respaldo y la parte de arriba del cuerpo del usuario. Por ello, es útil para detectar si el usuario está inclinado, en caso de que la lectura del sensor sea una distancia alta.

4.1 DISEÑO

El sensor escogido fue el HC-SR04. Se trata de un sensor ultrasónico. Este sensor lanza una onda ultrasónica a través del aire, espera a que rebote contra un obstáculo, y capta el eco. Dependiendo del tiempo que pase entre que lanza la onda hasta que detecta el eco, el sensor da una salida en forma de pulso, con una anchura proporcional al tiempo que tardó en detectar la señal de vuelta.



Figura 12. Sensor ultrasónico HC-SR04.

El sensor consta de cuatro patillas. Dos de ellas corresponden a la alimentación (siendo una de ellas la correspondiente a la tierra).

La patilla llamada *Trig*, es la que se usa para activar el sensor. Para ello, se ha de generar un pulso de 10 μ s. Cuando el sensor recibe el pulso en *Trig*, entonces



procede a generar la onda ultrasónica, que consta de ocho pulsos seguidos (con una frecuencia de 40kHz). Cuando termina de mandar el último pulso, la última patilla, *Echo*, comienza su pulso. Cuando el sensor detecta el ciclo de pulsos que mandó de vuelta, *Echo* termina su pulso. En la imagen siguiente, se ve el ciclo temporal de señales:

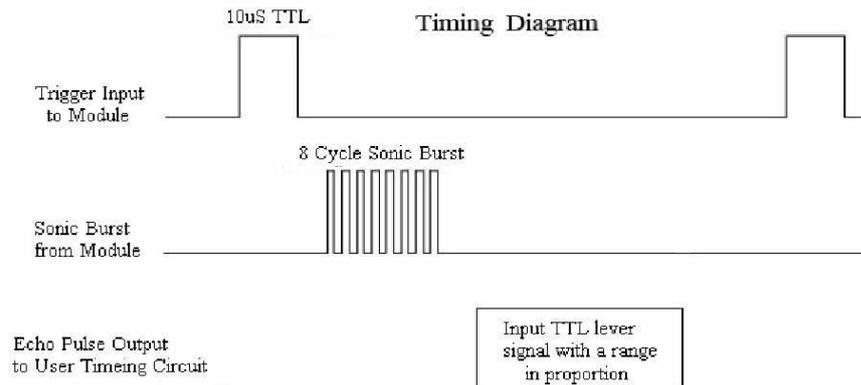


Figura 13. Gráfica temporal del sensor ultrasónico.

Entonces, el pulso de salida dura desde que la onda sale del sensor hasta que el eco vuelve. Es decir, nos está indicando el tiempo que tarda la onda en ir y volver. Si se multiplica el tiempo por la velocidad del sonido (340m/s), se obtiene la distancia que ha recorrido la onda en total. Si esta distancia se divide entre dos, se obtiene la distancia que recorrió antes de rebotar en el obstáculo, esto es, la distancia entre el sensor y el obstáculo.

A este sensor se le puso el requerimiento de que debía ser capaz de detectar la distancia a la que se encuentra el usuario cuando se inclina entre 45 y 60°.

4.2 PRUEBA Y VERIFICACIONES

Una vez el sensor estuvo habilitado, se procedió a probarlo, en la propia silla. Uno de los miembros del equipo, encargado de la programación, escribió un pequeño programa en el que se podían ver las lecturas.

Pronto, se notó que los requerimientos que se habían exigido al hacer el diseño no podían ser cumplidos.



Si bien las lecturas solían ser correctas, de vez en cuando se obtenían valores irreales. Por ejemplo, se obtenía una lectura de 5cm, seguida de una lectura de 90cm, cuando el usuario aún seguía en la silla. Se trató de buscar explicación a este fallo.

Ya que la mayoría de las lecturas eran correctas, se interpretó que el problema no era un fallo de implantación del sensor. Se buscaron explicaciones más físicas, como si el sensor estaba apuntando a la dirección correcta.

Aunque no se consiguió ninguna prueba concluyente de por qué fallaba, la explicación más razonable a la que se llegó fue a que era un problema angular. Se notó que las lecturas incorrectas eran más frecuentes cuando el usuario se inclinaba, es decir, cuando el obstáculo contra el que iba a rebotar la onda ultrasónica no estaba justo en la dirección a la que apuntaba el sensor, sino que estaba más abajo.

Lo que se creyó que ocurría fue que, al rebotar contra una superficie irregular, como es el cuerpo humano, podría ocurrir que la onda rebotada no llegara nunca de vuelta al sensor, sino que el eco fuera en otra dirección. Al no llegar de vuelta al sensor, este detectaría un valor muy alto, tal como estaba ocurriendo.

En la figura siguiente, se ilustra este fenómeno:

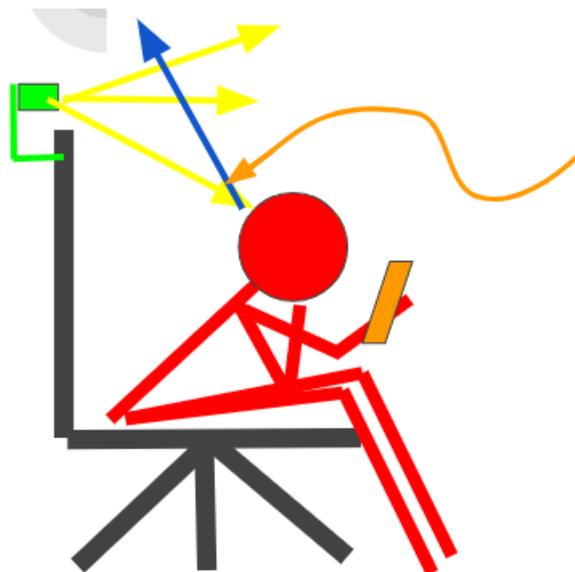


Figura 14. Esquema del problema angular del sensor ultrasónico.



La figura escenifica a una persona (color rojo) sentada en una silla (color gris oscuro). El sensor de distancia (color verde) se sitúa en la parte de arriba del respaldo de la silla. Cuando el sensor se activa, manda la señal ultrasónica (color amarillo), que se dispersa. Si, por infortunio, la onda reflejada (color azul) no llega al sensor, este no será capaz de calcular la distancia.

Ya que no se puede poner solución a un problema que no es de implantación, sino del propio concepto de “sensor ultrasónico”, se tomaron decisiones para reducir el impacto negativo de estas lecturas.

Se decidió que, cuando los miembros del equipo pertinentes desarrollaran los algoritmos de clasificación de posturas, se daría mayor peso a los sensores de presión que al sensor de distancia, con lo cual se reduciría el impacto de lecturas incorrectas. El sensor de distancia también se usó para confirmar si había un usuario sentado en la silla.

Con este sensor, se finalizó la parte del proyecto consistente en obtener información de la postura del usuario.

Capítulo 5 MOTORES DE VIBRACIÓN

Los motores de vibración son el actor principal a la hora de interactuar con el usuario. Si bien otros miembros del equipo trabajaron en otros módulos que también tienen este fin, como el GUI que se representa en el ordenador, este módulo será el principal encargado de avisar al usuario de que su postura es mala y debería cambiarla.

El motor elegido fue el C1034B018F, del fabricante Jinlong Machinery & Electronics.

5.1 DISEÑO

El motor usado es un motor inductivo, que se controlará mediante un transistor. El circuito diseñado fue el siguiente:

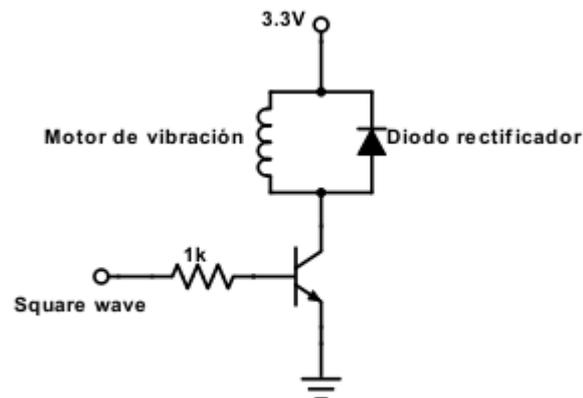


Figura 15. Esquema de implantación de un motor de vibración.

El elemento más llamativo del esquema es el diodo rectificador. La existencia de este diodo se debe al carácter inductivo del motor. La ley por la que se rige un inductor es la siguiente:



$$v = L \frac{di}{dt}$$

Esto es, la caída de tensión en una bobina es directamente proporcional a la variación de la intensidad que circula a través de ella con respecto al tiempo [13].

Analícese el circuito cuando la tensión que se aplica a la resistencia de 1k es 3.3V o nula.

Cuando es 3.3V, el transistor trabaja en modo activo. Si se supone una caída de tensión entre base y emisor de V_{BE} , por la base circula una corriente de:

$$I_B = \frac{3.3 - V_{BE}}{1k}$$

Luego, la intensidad que circula por el colector será la misma, pero multiplicada por β . Esa corriente que llega al colector sólo puede provenir del motor, pues el diodo no conducirá en sentido opuesto.

Si la tensión de la resistencia de 1k es 0, el transistor está en corte, esto es, no hay corriente que pase a través de él.

Si no se colocara un diodo de rectificación, y según lo explicado anteriormente, por el motor circularía una corriente mientras hay 3.3V en la resistencia, pero en cuanto la onda cuadrada pasa a su valor bajo (0V), sería cortada abruptamente, o lo que es lo mismo, la variación con respecto al tiempo de la intensidad sería altísima, lo cual conlleva una tensión en el motor altísima, también.

Esto haría que hubiera posibilidades serias de romper componentes del sistema, y no sólo el propio motor, sino también componentes cercanos como el transistor usado para controlar o el microcontrolador que aporta la onda cuadrada [14].

Para solucionar este problema, se coloca el diodo de rectificación. Este diodo habilita un “camino” por el cual la corriente puede fluir, de forma que, en lugar de cambiar abruptamente, cambia lentamente. Gracias a ello, no se produce ninguna tensión tan elevada como para poner en peligro el sistema [15].

Para que el motor funcione, se debe proporcionar una onda cuadrada a la base del transistor. Se puso una resistencia de 1k entre la onda cuadrada y el transistor, para



evitar fijar una tensión entre base y emisor (lo cual sería negativo, teniendo en cuenta que la tensión base-emisor es una de las características del transistor).

Una opción que se podría haber seguido sería agregarle un condensador pequeño, en paralelo con el motor y con el diodo. Supuestamente, esto haría que el circuito fuera más suave cuando el estado de activación de los motores cambia. No obstante, se decidió no usar un condensador al hacer el diseño. Esta decisión fue, finalmente, avalada cuando se realizaron simulaciones y pruebas, que confirmaron el buen funcionamiento de los motores aunque no hubiera condensador.

Para este módulo también se exigieron una serie de requerimientos, con el fin de asegurar el buen funcionamiento:

- Cuando un usuario se siente sobre los motores y estos se activen, debe notarlo claramente. Este requerimiento es básico, pues si el usuario no notara la vibración, el proyecto sería un proyecto fallido.
- La corriente a través del motor no debe superar los 120mA.
- Cada motor debe estar separado al menos 5cm del motor o sensor más cercano a él. Este requerimiento se puso con el fin de evitar cualquier tipo de interferencia.

5.2 SIMULACIÓN

Para hacer la simulación, se modeló el motor como una inducción con una resistencia en serie (Simscape te da la opción de poner una resistencia en serie con sólo cambiar un parámetro). Se modeló como una inducción de 0.1mH y resistencia serie de 30Ω.

En primer lugar, se hizo una simulación para confirmar las sospechas que surgieron en el diseño, esto es, qué ocurriría si no se usara un diodo rectificador.

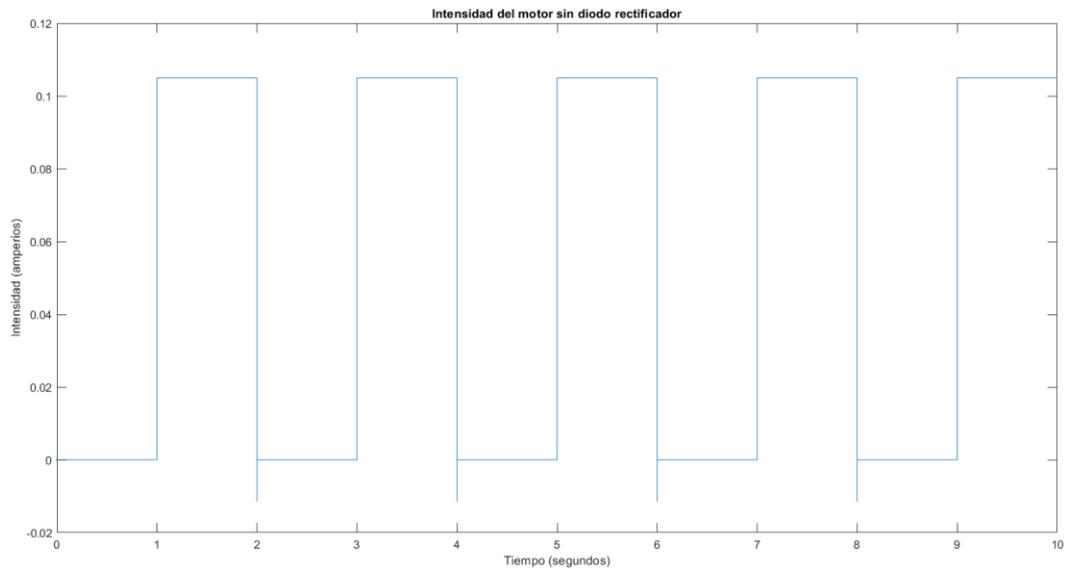


Figura 16. Intensidad a través del motor de vibración sin diodo rectificador.

En la imagen se ve como la intensidad cambia de forma instantánea cuando la onda cuadrada activa y desactiva el circuito.

Véase ahora la tensión del motor, que es la clave de este asunto.

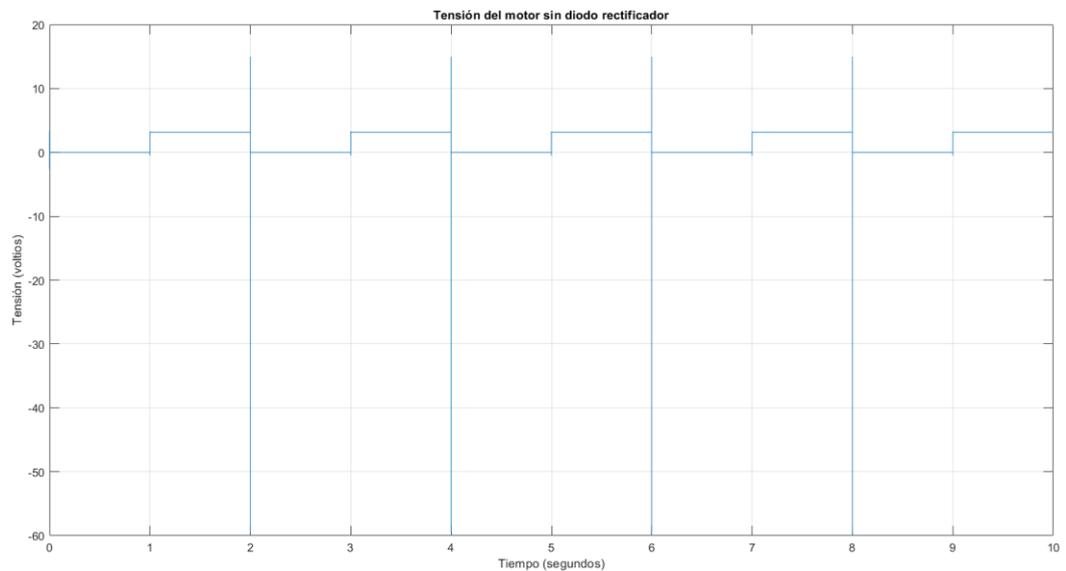


Figura 17. Tensión del motor de vibración sin diodo rectificador.

Si bien la mayoría del tiempo la tensión es normal, se observa que en los momentos en los que la corriente se interrumpe abruptamente (cuando el circuito se desactiva), se producen tensiones del orden de 60V.



Aunque este fenómeno ocurre durante muy poco tiempo, se trata de una tensión muy alta (más de diez veces las tensiones que se han usado para alimentar este sistema). Se tomó la decisión de no arriesgar con este diseño, y por ello se agregó el diodo rectificador.

Véase ahora la tensión del motor.

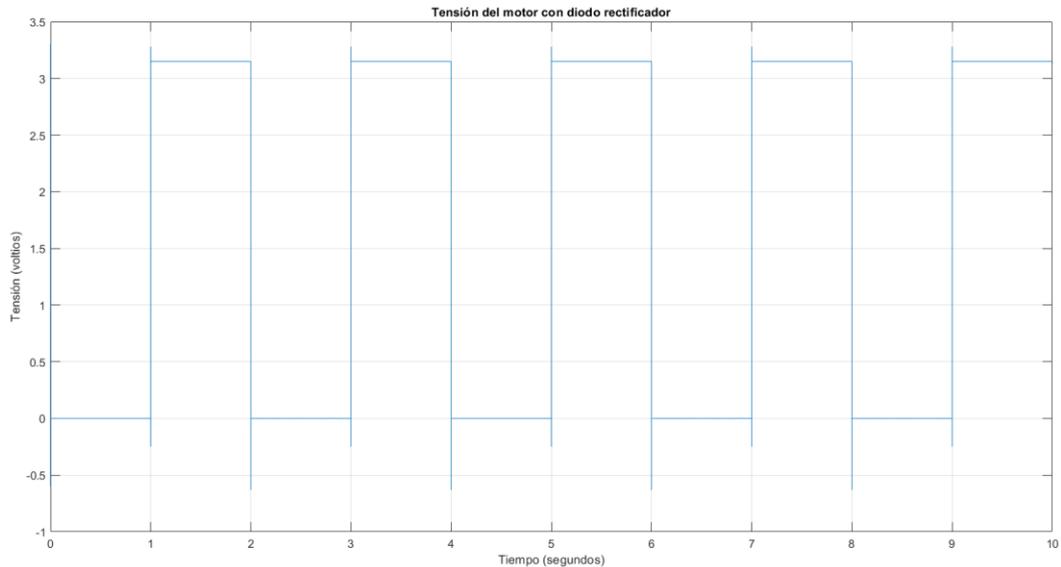


Figura 18. Tensión del motor de vibración con diodo rectificador.

Se observa que, aunque siguen existiendo unos picos de tensión en los momentos de cambio de estado del circuito, en este caso ya no son del orden de 60V, si no que no llegan a sobre pasar los 3.5V, lo cual es una tensión a la que el sistema está “acostumbrado”. Con esta configuración, si la simulación es correcta, el sistema no debería correr peligro.

Véase, por último, la intensidad a través del diodo rectificador.

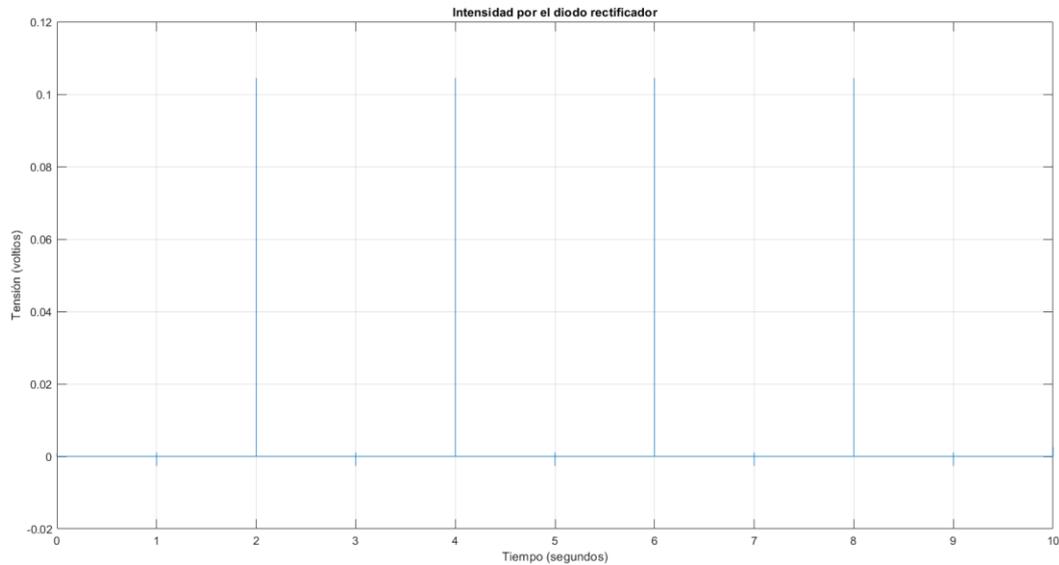


Figura 19. Intensidad a través del diodo rectificador.

Se observa que la mayoría del tiempo, no hay intensidad a través del diodo. Cuando el circuito se desactiva (una vez cada dos segundos), hay un pico, que es la corriente que originalmente estaba pasando por la inducción. Esa es, precisamente, la función del diodo: evacuar la corriente. En esta gráfica se ve que la evacuación se produce muy rápido, tan rápido que es inapreciable en la gráfica.

En conclusión, la simulación validó el diseño inicial (con diodo rectificador) y confirmó las sospechas sobre lo que podría ocurrir si no se incluyera el diodo. Por ello, se procedió a montar el circuito y hacer las pruebas pertinentes.

5.3 PRUEBA Y VERIFICACIONES

Si bien en el sistema final el motor será controlado por el microcontrolador (que será el que, dependiendo de la postura, dé la onda cuadrada), para hacer pruebas, se usó un generador de señales. La frecuencia nominal de la onda cuadrada para este modelo de motor, indicada en su *datasheet*, es de 0.25Hz. No obstante, esta frecuencia es muy lenta comparada con la velocidad con la que funciona la toma de decisiones del sistema (el algoritmo por el cual decide si la postura es buena o mala).



Por ello, si bien al principio se hicieron pruebas a frecuencia nominal, se fue aumentando poco a poco. Se vio que no influía en el motor y que seguía funcionando igual, por lo que, a la hora de implementar el circuito final, se aumentó esa frecuencia a 50Hz.

Aunque hubo dificultades a la hora de usar el motor en la *protoboard*, pues los cables del motor eran muy finos y era casi imposible engancharlos a ella, se consiguió probarlo.

Se vio que la vibración era muy intensa, lo cual es una buena noticia. Esta buena noticia se confirmó cuando, posteriormente, se probaron los motores en la propia silla y se comprobó que cualquier usuario notaría la gran vibración que producen.

Por otro lado, la intensidad no se pudo comprobar con la fiabilidad con la que se hubiera deseado. Se debe tener en cuenta que, en un motor de rotación, la corriente es más alta cuando el motor rota más lentamente. Por ello, el pico de intensidad, la corriente más alta que alcanza el motor en un momento dado, se produce en el arranque.

Se usó el amperímetro para medir la corriente, pero el arranque de este motor es muy rápido, demasiado rápido para poder comprobar la corriente con un amperímetro. Debido a que no se pudo comprobar la corriente máxima, se siguió adelante con el circuito.

En cuanto al último requerimiento, se fue cuidadoso con el lugar donde se colocaron los motores. Se colocaron en una disposición de cuadrado, donde el cuadrado imaginario que formarían los motores tendría lados paralelos al asiento de la silla. Ya que los sensores se habían colocado primero, se tuvo cuidado con dejar al menos 5cm entre motores y sensores.

Con la implantación de los motores, se finalizó el último de los módulos desarrollados para que el sistema funcione.

Uniendo los módulos aquí presentados a los módulos desarrollados por otros miembros del equipo (explicados en el capítulo 1.4), se pudo proceder a la fase final del proyecto, en la cual se juntan todos los módulos y se realizan las pruebas pertinentes para comprobar que el sistema funciona correctamente.





Capítulo 6 ANÁLISIS DE COSTES

El proyecto aquí expuesto es un proyecto eminentemente universitario. No obstante, como se expuso en el capítulo 1.1, se trata de un campo de pocos avances científico-tecnológicos, por lo menos en cuanto a la metodología de este proyecto.

Por tanto, aunque el objetivo final de este proyecto era realizar un prototipo, se trabajó con vistas a un posible carácter comercial del producto. Por ello, se hizo un breve análisis de costes del producto, teniendo en cuenta los costes de los diferentes componentes y los precios de posibles competidores.

Los costes de la alimentación, sensores y motores de la silla de guía de postura son los siguientes:

Alimentación

- Pack de 4 pilas AA
 - Cantidad: 1
 - Precio unitario: USD 3.59
 - Precio total: USD 3.59
- Adaptador de 4 pilas AA en serie
 - Cantidad: 1
 - Precio unitario: USD 2.80
 - Precio total: USD 2.80

Sensores de presión

- Resistencia sensible a fuerza (FSR)
 - Cantidad: 8
 - Precio unitario: USD 9.95
 - Precio total: USD 79.60
- Multiplexor analógico
 - Cantidad: 1
 - Precio unitario: USD 4.00
 - Precio total: USD 4.00



Sensor de distancia

- Sensor ultrasónico HC-SR04
 - Cantidad: 1
 - Precio unitario: USD 3.95
 - Precio total: USD 3.95

Motores de vibración

- Motores de vibración
 - Cantidad: 4
 - Precio unitario: USD 2.88
 - Precio total: USD 11.52

En estos cálculos, no se han tenido en cuenta componentes pequeños como resistencias, transistores o diodos. En primer lugar, porque la Universidad los proporcionó gratuitamente; y en segundo lugar, porque incluso si se intenta replicar este proyecto, se podrían conseguir a bajo precio. Tampoco se tuvo en cuenta el coste de ningún programa informático usado durante el proyecto.

El precio total, por tanto, sería de USD 105.46. Si se quiere montar el sistema completo habría que añadir los costes de los componentes utilizados por otros miembros del equipo.



Capítulo 7 SEGURIDAD Y ÉTICA

El principal problema de seguridad que puede tener el sistema aquí presentado es la electricidad. En el proyecto aquí presentado, hay dos componentes que, debido a su función, van a estar en contacto con el usuario: los sensores de presión y los motores.

La mayoría de los elementos de este sistema, como los reguladores de tensión u otros elementos diseñados por otros miembros del equipo, se soldaron a una PCB. Esta PCB se localizó detrás del respaldo de la silla, para que el usuario no estuviera en contacto con ella. No obstante, en los componentes anteriormente señalados, no hay otra opción que no sea localizarlos en contacto con el usuario y, por tanto, habrá cables en contacto con el usuario.



Figura 20. Vista trasera de la silla.

La solución que se propone es el aislamiento de estos materiales. Se decidió que ni los motores ni los sensores estarían en contacto directo con el usuario, si no que se usaría cinta aislante entre ellos y el usuario. Esto cumpliría dos funciones. Por un lado, fija los componentes a la silla, de forma que no estén sueltos (y evita tener que hacer uso de otros materiales para pegarlos), y además aísla los componentes.



La cinta aislante también se usó para aislar los cables que conectaban sensores y motores con la PCB.



Figura 21. Vista delantera de la silla.

En cuanto a la ética, los autores de este proyecto consideran que se trata de un proyecto ético, y de hecho, fue uno de los motivos por los cuales se siguió adelante con el proyecto.

De acuerdo con el código ético del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), este proyecto es ético, pues cumple con varias de sus premisas. La primera premisa del código ético del IEEE es que un proyecto es ético si ayuda a promover la seguridad, la salud y el bienestar de la gente, se esfuerza por conseguir un diseño ético y prácticas de desarrollo sostenible, y se revelan sin demora los factores que puedan poner en peligro a la gente o al medio ambiente, si los hay [16].

Si bien en este proyecto hay varios objetivos, como la eficiencia eléctrica, el principal objetivo es que el sistema sepa distinguir correctamente entre buenas y malas posturas, para que se puedan corregir. Es decir, la intención de este proyecto, su motivación, es corregir mala postura, que como se mencionó en la introducción de esta memoria, es la mayor causa de los problemas de espalda. En conclusión, no solo es que el proyecto promueva la salud y el bienestar de la gente, es que su objetivo principal es mejorarla.



No obstante, para que se pueda afirmar con seguridad que cumple con esta premisa, se debe estar seguro de que el proyecto funciona bien, es decir, que distingue bien las posturas. La tercera premisa del código ético del IEEE dice que, para que un proyecto sea ético, se debe ser honesto y realista a la hora de hacer afirmaciones o estimaciones usando los datos disponibles. El dolor de espalda es un problema serio, y, aunque la mayoría de veces tiene un origen simple como la mala postura, puede deberse a causas más peligrosas. Por ello, se debe ser humilde a la hora de hacer afirmaciones absolutas sobre este proyecto, que, al fin y al cabo, sólo usa nueve sensores para conseguir la información con la que se decide la calidad de la postura del usuario.

Otro enfoque ético con el cual se puede interpretar este proyecto es, en lugar de usar códigos éticos ingenieriles, usar teorías éticas universales. Se hará un breve análisis, sin ánimo de hacer una divagación filosófica, sobre el carácter ético de este proyecto.

Una de las teorías éticas más conocidas y usadas es la teoría de Aristóteles [17]. Esta teoría promueve la ética de la virtud, y es una de las primeras teorías éticas. Esta teoría establece que, para seguir una senda ética, el ser humano debe seguir la virtud. Las virtudes son cualidades positivas de las personas. Así, algo es ético si es al hacerlo, se está siendo virtuoso.

En este caso, al hacer esta silla se está promoviendo el bienestar y la salud, pues es una solución a un problema de salud que mucha gente tiene. Al desarrollar este proyecto, se está siendo generoso, benevolente y solidario, pues se está desarrollando algo con el ánimo de ayudar a la gente. Por consiguiente, se trata de una práctica virtuosa, luego este proyecto es ético.

Otra teoría ética es el utilitarismo, desarrollada, principalmente, por Jeremy Bentham [18]. Esta teoría afirma que algo es ético si contribuye al bienestar de las personas. Se trata de una teoría consecuencialista, pero al contrario que otras, esta teoría es colectiva y no promueve el bienestar individual.

Al realizar este proyecto, se está promoviendo el bienestar de las personas que usen la silla y, en todo caso, no se está perjudicando a nadie. Al beneficiar a algunos y



no perjudicar a nadie, se está contribuyendo positivamente al bienestar promedio de la humanidad, luego este proyecto es ético.

Por último, se analizará el proyecto usando la ética deontológica, también conocida como ética del deber [19]. Esta teoría la desarrolló Immanuel Kant en su *Crítica de la razón práctica* (1788). Kant establece que, para obrar éticamente, se debe obrar según una máxima por la cual se pueda querer que se convierta en una norma universal.

Por ello, la clave para saber si este proyecto es ético, según esta teoría, es ver si sería deseable que lo que se ha realizado en este proyecto fuese norma universal. ¿Sería deseable que se usara la tecnología para desarrollar soluciones alternativas y novedosas a problemas de salud? La respuesta es afirmativa, pues si así fuera, la salud global mejoraría.

En resumen, este proyecto tiene pocos problemas de seguridad. Si estos pocos problemas, como el aislamiento de los cables, se solucionan, la probabilidad de que un usuario sea dañado usando la silla es ínfima. Si se consigue este objetivo de seguridad, no cabría duda de que se trata de un proyecto ético, tanto si se analiza desde un punto de vista ingenieril como si se hace desde alguna de las teorías éticas más importantes de la filosofía.



Capítulo 8 CONCLUSIONES

Después del diseño, simulación, pruebas y montaje de los diferentes componentes, llegó el momento de probar el proyecto completo, integrando el trabajo de todo el equipo.

Los tres miembros del equipo probaron la silla, y dicha prueba fue exitosa. Si se empezaba con una buena postura, la silla permanecía tal como estaba. Si se asumía una postura claramente mala (inclinándose hacia adelante, hacia un lado...), los motores de vibración empezaban a funcionar. Por ello, se consideró que el objetivo principal estaba cumplido.

Por otro lado, tal y como el equipo había previsto, no era posible hacer una clasificación muy estricta de las posturas. Esto se debe a que los nueve sensores de los que consta el proyecto no son capaces de dar una información tan relevante y precisa como para conseguir este objetivo.

Dada esta falta de precisión, y teniendo en cuenta que uno de los objetivos del proyecto era que la silla no fuese intrusiva, es decir, que moleste lo menos posible, se optó por ser conservador: si el usuario adopta una postura intermedia (esto es, una postura que no es ideal pero tampoco claramente mala), el sistema interpretará que es buena postura.

Se hará un análisis DAFO (debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades) sobre el proyecto [20].

La principal fortaleza es, lógica y simplemente, que el sistema funciona. Cumple con el objetivo que se asignó al comienzo del trabajo. Sobre los otros objetivos, dos de ellos se cumplieron totalmente. El objetivo de conseguir un consumo de potencia bajo se consiguió, debido al diseño cuidadoso del sistema. Por otro lado, el objetivo de tener unos costes asequibles también se cumplió. Si bien el coste de un producto siempre es relativo, se cree que los diferentes componentes fueron rentables.

En cuanto a las debilidades, se podría citar que el segundo objetivo de los marcados, el de hacer una silla que no sea intrusiva, no se consiguió totalmente. Los miembros



del equipo encargados del *machine learning* fueron conservadores a la hora de diseñar el sistema. Esto quiere decir que, si la postura es intermedia (esto es, no es una postura ideal pero tampoco se puede considerar dañina), el sistema considerará que la postura es buena y no activará los motores de vibración.

No obstante, el sistema no es perfecto. Si bien hubo satisfacción con el resultado final, y se cree que con el nivel de los sensores (tanto en número como en calidad) no se puede hacer una clasificación de la postura mucho mejor, a veces puede haber fallos, tales como un breve arranque de los motores cuando teóricamente no deberían arrancar.

Otra debilidad ya había sido anticipada por el equipo con anterioridad, pues es un tema de diseño relacionado con las decisiones realizadas, y no un problema de ejecución. Se trata de no considerar la variable “tiempo” a la hora de realizar la clasificación de posturas.

La clasificación se hace, única y exclusivamente, dependiendo de nueve variables (ocho tensiones provenientes de los sensores de presión y una distancia, proporcionada por el sensor ultrasónico). Si una postura es considerada mala, dará igual el tiempo que el usuario lleve en esa postura, pues el sistema no tiene dependencia temporal.

Sin embargo, esto no es acorde a la realidad. Obviamente, no es igual que el usuario adopte mala postura cinco segundos a que lleve en mala postura cinco minutos. Por ejemplo, si al usuario se le cae un objeto al suelo y se agacha para recogerlo, el sistema interpretará que el usuario ha adoptado mala postura. El hecho de que el sistema pueda activar los motores en este tipo de ocasiones era algo que ya había sido previsto por el equipo, pero no deja de ser una debilidad.

Otra debilidad es el efecto estético. Si se observa la figura 20, se ve la cinta aislante de los sensores y los motores. También hay cables a la vista, y si se mira por detrás, se ve la PCB. Aunque este sea un proyecto universitario, se cree que este producto puede tener un futuro comercial. Por ello, aunque no sea una debilidad propiamente dicha para un proyecto universitario, si se quiere ir más allá, se debe mejorar el efecto estético. Muchas personas basan sus elecciones a la hora de comprar en el



aspecto exterior de los productos, y, con certeza, eso descartaría el producto aquí presentado.

Por último, otra debilidad tiene que ver con la fiabilidad. El día en el que este equipo realizó la presentación del proyecto delante del profesor, el módulo Bluetooth dejó de funcionar. Se tuvo que recurrir a un módulo de repuesto. Si bien al final no hubo consecuencias, esto sería algo inaceptable en un producto comercial.

En tercer lugar, hablese de las oportunidades, de por qué este producto puede ser exitoso. Como se analizó en el capítulo 1.1, este producto se encuentra en un campo prácticamente inexplorado. Esto hace que no tenga competencia que “desbancar”, por lo que no depende de los aciertos o errores de los competidores. Por otro lado, se cree que, si se realiza una mejora a este proyecto, tanto en temas relacionados con software como relacionados con hardware (como la calidad de los sensores), se puede mejorar sustancialmente el producto.

Por último, se deben analizar las amenazas. Por un lado, se debe tener en cuenta que, si bien se ha comentado que el hecho de que no todavía no existan productos similares es una oportunidad, esto también tiene un lado negativo, las sillas ergonómicas. Como se comentó en el capítulo 1.1, la gran apuesta a la hora de usar sillas para prevenir el dolor de espalda es la ergonomía, no la electrónica. En este proyecto, se decidió hacer una apuesta novedosa y diferente. Por tanto, es una oportunidad, pues no existe nada similar; pero al mismo tiempo es una amenaza, pues este es un proyecto que va contra el *statu quo*.

Por último, hablese de un resultado curioso: la dependencia con las distintas variables. Como se ha comentado anteriormente, la postura depende de nueve variables, y ocho de ellas son sensores de presión. Entonces, cabe hacerse la pregunta de cuál, o cuáles, de ellos tienen más influencia en la detección de la postura.

Obsérvese la siguiente gráfica:

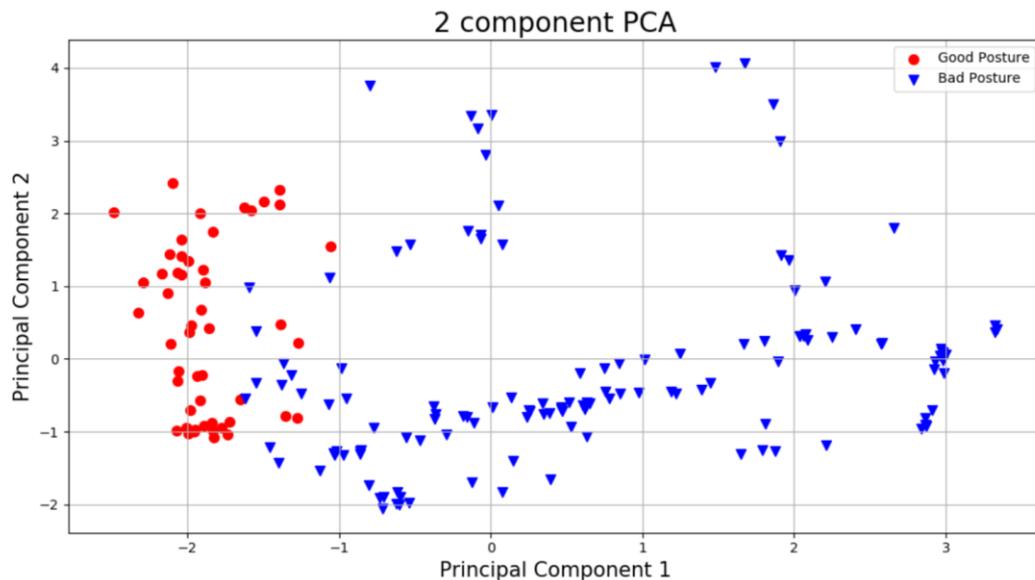


Figura 22. Análisis de componentes principales.

Si bien esta gráfica no fue obtenida por el autor de esta memoria, pues tiene que ver con la parte de *machine learning*, es útil para explicar la dependencia de la postura con las lecturas de los sensores. Se observan dos componentes en esta gráfica. Cuando el componente principal 1 se mantiene constante, lo que en esta gráfica equivaldría a moverse en una línea vertical, prácticamente todas las posturas están determinadas. Por el contrario, cuando el componente que se mantiene constante es el componente principal 2, lo que en la gráfica sería moverse horizontalmente, la postura todavía puede ser buena o mala.

En conclusión, en esta gráfica se observa como un componente, el componente principal 1, tiene una influencia enorme sobre la detección de posturas; mientras que el componente principal 2 tiene menos influencia. La componente principal 1, consta de los sensores equivalentes a la parte trasera del asiento y a la parte baja del respaldo (que en el cuerpo humano equivaldrían a los glúteos y las lumbares).

Esto puede ser un dato útil para futuros desarrollos, pues se puede saber qué zonas de la silla interesa controlar más.



Capítulo 9 FUTUROS DESARROLLOS

Como se comentó en el capítulo anterior, este proyecto universitario acabó resultando en un prototipo, algo que es útil para comprobar los avances del equipo y sacar conclusiones, así como analizar fortalezas y debilidades del sistema.

No obstante, si se desea que este proyecto dé el paso a ser algo comerciable, hay muchas cosas que deben mejorarse. Algunas de las debilidades del proyecto fueron analizadas en el capítulo anterior. Ahora se analizará qué se puede hacer para hacer la silla más precisa y más atractiva.

Si bien este capítulo tiene ánimo de analizar brevemente posibles mejoras, y no hacer un estudio de mercado, es un hecho que el aspecto exterior es algo que marca notablemente a los consumidores. Si bien el hecho de que todavía no se ha hecho nada similar este sistema puede jugar en su ventaja, esto también puede generar dudas en los consumidores.

Si los consumidores tienen dudas sobre el proyecto, un aspecto que sin duda va a marcar sus decisiones es la estética, lo que aparente ser el producto [21]. Actualmente, como se observa en las figuras 19 y 20, en este proyecto se observa la cinta aislante que sujeta los sensores y los motores, la PCB, y los cables que los unen. Definitivamente, no se trata de un producto “bonito”, y seguramente, si este producto saliera al mercado, fracasaría.

Las mejoras pasan, entre otras cosas, por intentar ocultar estos componentes. Se debe intentar que la silla tenga aspecto de “silla normal” y que no se vea claramente que se trata de una silla con componentes electrónicos en ella.

No obstante, el ocultar estos componentes también puede tener consecuencias. Por ejemplo, una solución fácil para tapar los motores y sensores es usar un cojín. No obstante, este cojín modificaría significativamente la fuerza a la que están sometidos los sensores de presión. También modificaría las sensaciones del usuario a la vibración de los motores.



Es imposible de prever qué decisiones de diseño habría que adoptar sin probar el sistema, pero es posible que sólo haya que hacer una recalibración de los sensores (al estar el cojín entre el usuario y ellos, la fuerza se distribuirá más uniformemente por la silla).

Por otro lado, también se pueden hacer mejoras relacionadas con la obtención de información relacionada con la postura. De los nueve sensores, los ocho sensores de presión funcionaron bien y dieron mucha resolución, pero no destacan por su precisión. Por ello, si se quiere ser perfeccionista, se debe buscar sensores más fiables y precisos.

El otro sensor del sistema, el sensor ultrasónico de distancia, no funcionó como sería deseable. Se intercalaban lecturas correctas con lecturas sin sentido. Por ello, si se hacen planes de mejora de este proyecto, se debería sustituir este sensor por otro. Se podría prescindir del sensor de distancia y buscar otro tipo de sensores (al fin y al cabo, el sistema funcionó bien incluso con un sensor de distancia que no funcionaba idealmente), o se podría buscar otra forma de obtener la distancia.

Obviamente, si se desea mejorar la precisión del sistema, debería aumentarse el presupuesto. Esta sería una decisión comprometida, pues de ello dependería el precio final del producto. Como se comentó al hacer el análisis DAFO del capítulo 8, las sillas ergonómicas son mayoría y hay un amplio rango de precios sobre ellas.

Otra mejora podría ser añadir la variable “tiempo” al análisis. Es decir, que la información de los sensores se complemente con el tiempo que el usuario lleva en una postura determinada. Una solución fácil sería hacer que, si el sistema detecta mala postura, no active inmediatamente los motores, sino que espere unos segundos. Es decir, que active los motores si y sólo si el usuario lleva, por ejemplo, veinte segundos en mala postura y no inmediatamente. También se podrían acometer soluciones más complejas, pero eso ya dependería de otros miembros del equipo que tendrían que desarrollar algoritmos más complejos.

Otras mejoras más generales, conceptuales, podrían ser usar una página web para mostrarle el GUI al usuario, o mostrar datos históricos al usuario, lo cual sería útil



para analizar si la calidad promedio de las posturas adoptadas ha mejorado, empeorado o se mantiene igual.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sanitas, “¿Qué es la medicina preventiva?”. [En línea]. Disponible: <https://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/prevencion-salud/san041826wr.html>. [Accedido: 28-06-18]
- [2] American Chiropractic Association, “Tips to Maintain Good Posture”. [En línea]. Disponible: <https://acatoday.org/content/posture-power-how-to-correct-your-body-alignment>. [Accedido: 28-06-18]
- [3] The Independent, “9 best ergonomic office chairs”. [En línea]. Disponible: <https://www.independent.co.uk/extras/indybest/house-garden/furniture/best-ergonomic-office-chairs-for-back-neck-shoulder-pain-fibromyalgia-tall-short-person-9779862.html>. [Accedido: 28-06-18]
- [4] L. Martins, R. Lucena, J. Belo, M. Santos, C. Quaresma, A.P. Jesus y P. Vieira, “Intelligent Chair Sensor”, Universidade Nova de Lisboa. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/257610874_Intelligent_Chair_Sensor_Classification_of_Sitting_Posture. [Accedido: 28-06-18]
- [5] Mathworks, “Model and simulate multidomain physical domains”. [En línea]. Disponible: <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>. [Accedido: 30-06-18]
- [6] Universidad Politécnica de Madrid, “Diodo Zener”, Ingeniatic. [En línea]. Disponible: <http://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/436-diodo-zener.html>. [Accedido: 01-07-18]
- [7] Circuits Today, “Voltage Regulators”. [En línea]. Disponible: <http://www.circuitstoday.com/voltage-regulators>. [Accedido: 01-07-18]
- [8] Universidad de Granada, “El Transistor de Unión Bipolar”. [En línea]. Disponible: <http://electronica.ugr.es/~amroldan/deyte/cap03.htm>. [Accedido: 01-07-18]
- [9] Writeup, “Strain gauge load cell”. [En línea]. Disponible: <http://instrumentationandcontrollers.blogspot.com/2010/09/strain-gauge-load-cell.html>. [Accedido: 02-07-18]



- [10] Universidad de Granada, “Percolación: un cambio de fase geométrico”. [En línea]. Disponible:
<http://ergodic.ugr.es/cphys/LECCIONES/percolacion/percolacion.pdf>.
[Accedido: 03-07-18]
- [11] Hablando de Ciencia, “Efecto túnel o cómo la cuántica se ríe de ti”. [En línea].
Disponible: <https://www.hablandodeciencia.com/articulos/2012/06/07/7052/>.
[Accedido: 03-07-18]
- [12] Electrónica Unicrom, “Comparador con Amplificador operacional”. [En línea].
Disponible: <https://unicrom.com/comparador-con-amplificador-operacional/>.
[Accedido: 03-07-18]
- [13] All About Circuits, “Inductors and Calculus: Chapter 15 - Inductors”. [En
línea]. Disponible: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-15/inductors-and-calculus/>. [Accedido: 03-07-18]
- [14] Daycounter, Inc. Engineering Services, “Inductive Voltage Spike”. [En línea].
Disponible: <http://www.daycounter.com/Articles/Inductive-Voltage-Spike.phtml>. [Accedido: 03-07-18]
- [15] West Florida Components, “Why does an inductor need a fly-back diode?”. [En
línea]. Disponible: <https://www.westfloridacomponents.com/blog/inductor-need-fly-back-diode/>. [Accedido: 03-07-18]
- [16] Institute of Electrical and Electronic Engineers, “IEEE Code of Ethics”. [En
línea]. Disponible: <https://www.ieee.org/about/corporate/governance/p7-8.html>.
[Accedido: 04-07-18]
- [17] BBC, “Virtue ethics”. [En línea]. Disponible:
<http://www.bbc.co.uk/ethics/introduction/virtue.shtml>. [Accedido: 04-07-18]
- [18] BBC, “Consequentialism”. [En línea]. Disponible:
http://www.bbc.co.uk/ethics/introduction/consequentialism_1.shtml.
[Accedido: 04-07-18]
- [19] BBC, “Duty-based ethics”. [En línea]. Disponible:
http://www.bbc.co.uk/ethics/introduction/duty_1.shtml. [Accedido: 04-07-18]
- [20] Emprendedores, “Cómo se hace un análisis DAFO”. [En línea]. Disponible:
<http://www.emprendedores.es/gestion/como-hacer-un-dafo/como-hacer-un-dafo2>. [Accedido: 04-07-18]
-



- [21] C. Bravo, “La estética y su impacto en la calidad percibida de tu producto”, Marketing de guerrilla en la web 2.0. [En línea]. Disponible: <http://www.marketingguerrilla.es/la-estetica-y-su-impacto-en-la-calidad-percibida-de-tu-producto/>. [Accedido: 04-07-18]

