



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE BAJO COSTO PARA LA ALIMENTACIÓN DE UN PERRO

Autor

Diego Marcos Otal

Director

Barry Piorkowski

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE BAJO COSTO PARA LA ALIMENTACIÓN DE UN PERRO

Resumen

Hoy en día la sociedad es consciente de que los hábitos alimenticios tienen un efecto directo en la salud y es importante que la comida sea de buena calidad, a las horas apropiadas y en las cantidades adecuadas. Sin embargo, en la sociedad el problema del exceso de peso está incrementando y esta tendencia parece no tener final, siendo el 25% de la población mundial obesa. Este problema no sólo afecta a las personas, ya que en el caso de los animales los datos son incluso más preocupantes, pues el porcentaje alcanza el 50%.

Como solución para este problema se ha diseñado y construido un sistema para alimentar a un perro de manera adecuada dependiendo del tamaño y la raza de la mascota. Además, el dueño no tiene que estar preocupado por estar en casa para alimentarlo o dejarle una gran cantidad de comida que el perro se come de una sola vez.

Se ha diseñado un sistema automático de alimentación para perros haciendo una investigación y analizando los requerimientos del cliente para el alimentador a través de encuestas a propietarios y tiendas especializadas. Además, se han investigado las necesidades de los perros, focalizando los tamaños y razas para los cuales el sistema estaba dirigido. Posteriormente, se generaron múltiples ideas y se evaluaron las ventajas e inconvenientes de cada una. Se diseñaron las partes mecánicas y electrónicas de manera teórica basadas en cálculos y subsiguientemente se simularon. Un prototipo con el mismo concepto que el diseño teórico fue construido para entender el principio de funcionamiento de este sistema haciendo las modificaciones apropiadas a lo largo de su desarrollo. El prototipo fue comprobado y ensayado con comida real.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la supervisión de mi tutor en University of Central Lancashire, Dr. Barry Andrew Piorkowski, por su consejo semanal durante todo el curso y su ayuda con la estructuración del informe; la colaboración del moderador del proyecto, Dr. David Heys, también por sus recomendaciones semanales y sus consejos para la redacción del proyecto. También reconocer a todos los técnicos de Wharf Building, que me ayudaron con la construcción y la producción de todas las piezas y me facilitaron el uso de cualquier máquina que necesité.

También quería agradecer a mi ponente en la Universidad de Zaragoza, Jesús Acero Acero, por su receptividad, supervisión y asistencia en los momentos necesarios.

En el ámbito más personal me gustaría agradecer a mi familia, que me apoyó en los momentos difíciles, me dio la oportunidad de estudiar en esta universidad y tener una experiencia muy útil tanto en el ámbito personal como profesional; a mi novia, que me ha ayudado y animado mucho siempre con todas las dificultades durante toda la carrera y sin la que este proyecto no sería posible, y a los amigos, incluyendo los que he hecho durante la etapa universitaria que también me han apoyado a conseguirlo.

Tabla de contenido

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Introducción | 8 |
| 1.1 | Concepto del Proyecto en UCLan | 8 |
| 1.2 | Concepto del alimentador automático | 8 |
| 1.3 | Justificación..... | 9 |
| 1.4 | Propósito y objetivos | 9 |
| 2 | Revisión de literatura | 10 |
| 2.1 | Estado de la técnica | 10 |
| 2.2 | Diseño del sistema mecánico | 11 |
| 2.3 | Métodos de diseño del producto..... | 12 |
| 3 | Metodología | 13 |
| 3.1 | Captura de requerimientos | 13 |
| 3.1.1 | Encuestas a propietarios de perros y tiendas especializadas..... | 13 |
| 3.1.2 | Utilidad de la encuesta en el diseño | 13 |
| 3.1.3 | Determinación del tamaño de perros para el que se dirige el sistema | 14 |
| 3.1.4 | Información de las necesidades de estos tipos de perros | 15 |
| 3.2 | Lluvia de ideas | 15 |
| 3.2.1 | Generación de ideas | 15 |
| 3.2.2 | Análisis de ideas | 15 |
| 3.3 | Simulación..... | 17 |
| 3.4 | Estimación de los requisitos del sistema | 18 |
| 3.4.1 | Diseño del contenedor..... | 18 |
| 3.4.2 | Selección del motor..... | 19 |
| 3.5 | Prototipo construido | 22 |
| 3.5.1 | Parte mecánica | 24 |
| 3.5.2 | Parte electrónica..... | 29 |
| 4 | Resultados y Discusión / Debate..... | 33 |
| 4.1 | Resultados de la encuesta..... | 33 |
| 4.2 | Prototipo final..... | 35 |
| 5 | Conclusiones | 36 |
| 6 | Referencias..... | 37 |
| | Apéndice A – Autores y Patentes | 39 |

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| Apéndice B – Diagrama de Gantt | 42 |
| Apéndice C – Time Plan | 43 |
| Apéndice D – Registro de riesgos..... | 44 |
| Apéndice E – Especificaciones del producto..... | 45 |
| Apéndice F – Encuesta..... | 47 |
| Apéndice G – Bocetos | 50 |
| Apéndice H – Soldadura de Arco de Gas Tungsteno | 54 |
| Apéndice I - Características Placa Arduino UNO | 55 |
| Apéndice J – Arduino Motor Shield characteristics | 56 |
| Apéndice K – Arduino code (Sarafan, R.)..... | 57 |
| Appendix L – Arduino code | 59 |
| Appendix M – Hoja de características del microrruptor..... | 62 |
| Apéndice N – Resultados comparativa | 63 |

Índice de figuras

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Boceto 1 | 16 |
| Figura 2- Diseño y simulación del sistema | 17 |
| Figura 3- Forma troncocónica..... | 18 |
| Figura 4- Diseño del contenedor..... | 22 |
| Figura 5- Recipiente usado | 23 |
| Figura 6- Prototipo construido | 23 |
| Figura 7- Máquina CNC fabricando las piezas..... | 24 |
| Figura 8- Piezas fabricadas | 25 |
| Figura 9- Pieza de unión manufacturada | 26 |
| Figura 10- Ajuste del tornillo de la pieza de unión..... | 26 |
| Figura 11- Soldadura de pieza de unión | 27 |
| Figura 12- Soporte del motor..... | 28 |
| Figura 13- Soldadura del soporte..... | 28 |
| Figura 14- Soporte de batería y motor empleados | 29 |
| Figura 15- Arduino UNO y Arduino Motor Shield | 30 |
| Figura 16- Microrruptor..... | 31 |
| Figura 17- Ranuras para el microrruptor | 32 |
| Figura 18- Funcionamiento del microrruptor | 32 |
| Figura 19- Frecuencia de alimentación diaria..... | 33 |
| Figura 20- Cantidad de comida..... | 33 |
| Figura 21- Tipo de comida..... | 34 |
| Figura 22- Proceso de montaje | 35 |
| Figura 23- Montaje final | 35 |
| Figura 24- Diagrama de Gantt | 42 |
| Figura 25- Planificación..... | 43 |
| Figura 26- Bocetos..... | 53 |
| Figura 27- Soldadura TIG..... | 54 |

Índice de tablas

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1- Comparación diseños comerciales | 11 |
| Tabla 3- Autor y Patente | 41 |
| Tabla 4- Registro de Riesgos | 44 |
| Tabla 5- Especificaciones del producto | 46 |
| Tabla 6- Características Arduino UNO..... | 55 |
| Tabla 7- Características Arduino Motor Shield | 56 |
| Tabla 8- Características del microrruptor | 62 |
| Tabla 9- Comparación entre sistema comerciales | 63 |

1 Introducción

1.1 Concepto del Proyecto en UCLan

La realización de este proyecto se llevó a cabo en la Universidad de Central Lancashire (Preston, Reino Unido). El concepto del proyecto de este país es algo diferente a lo que aquí denominamos Proyecto Fin de Carrera.

En primer lugar, el proyecto ha de definirlo el propio autor. En este caso se optó por un alimentador automático para perros por aunar conceptos mecánicos y electrónicos, ya que la titulación de Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza incluye ambas ramas.

En segundo lugar, se exige la realización de un proyecto mucho más práctico que en España, por lo que uno de los aspectos más valorables es la realización de un prototipo de manera sencilla para que el alumno obtenga los conocimientos necesarios para la realización final. La parte teórica queda en un segundo plano, siendo más simple que la que normalmente se incluye en un PFC de la Universidad de Zaragoza.

Además, en Reino Unido se plantea el proyecto con diferentes entregas a lo largo del año y estableciendo rigurosamente las fases de diseño, planificación, requerimientos, declaración de trabajo, etc... necesarias para el lanzamiento de un producto.

Durante la redacción de este proyecto en español se ha tratado de explicar lo mejor posible tanto la parte teórica como la realización de dicho prototipo.

El proyecto original fue entregado y posteriormente evaluado en la Universidad de Central Lancashire.

1.2 Concepto del alimentador automático

El concepto de un sistema automático de alimentación para perros ha cambiado con el tiempo. Aunque parece una idea nueva, los primeros pasos fueron dados en la década de 1940. El concepto ha cambiado y ahora está mejor visto. Hay muchas razones que explican este cambio:

- En primer lugar, y más importante, la salud del perro, ya que con estos sistemas se evita la sobrealimentación y sólo comen a las horas apropiadas y la cantidad adecuada.

- El otro punto importante es que el propietario no esté preocupado sobre si tiene que estar en casa o no para alimentar a su mascota. Con el progreso realizado en este tipo de dispositivos no hay razón para la preocupación porque son sistemas seguros.

Hay dos funciones que el propietario tiene que hacer con estos sistemas de alimentación:

- Introducir la comida en el sistema.
- Limpieza de las diferentes partes (todos los sistemas comerciales tienen partes separables para facilitar la limpieza de las mismas).

1.3 Justificación

Hoy en día es común el exceso de peso en los perros, tal y como muestra la investigación elaborada por Hill's Pet Nutrition. Más de un 50% de estas mascotas tienen este problema a pesar de que el 76% de los usuarios piensan que sus perros tienen un peso adecuado. Este exceso de peso puede derivar en enfermedades serias (como un incremento del riesgo de enfermedades de corazón, diabetes, problemas respiratorios y baja resistencia inmune) y acorta la vida del animal (Hill's Pet, 2013). Por otra parte, en cuanto a la vida del propietario, ya que cada día se vive en una sociedad donde se tiene una vida más ocupada y se necesita ahorrar tiempo y no estar preocupado sobre estar en casa para alimentar a sus mascotas. Esto deriva en mala alimentación, pues los dueños suelen dejar más comida a sus perros y el animal se la come de una vez, instintivamente, sin la capacidad de razonar. Otra consecuencia extraída de este estudio sería el ahorro de dinero y comida debido a que ésta será proporcionada en la cantidad adecuada con este sistema de alimentación.

1.4 Propósito y objetivos

El propósito de este proyecto es desarrollar un sistema que permita alimentar a un perro de manera automática. El paso a paso del proyecto es:

- i) Captura y análisis de los requerimientos del cliente para el sistema.
- ii) Diseño y comprobación del sistema electro-mecánico.
- iii) Construcción y evaluación de un prototipo.

2 Revisión de literatura

2.1 Estado de la técnica

Existen muchas patentes de sistemas automáticos para alimentar a perros con diferentes soluciones mecánicas. Uno de los más antiguos consta de engranajes con uniones soldadas y atornilladas, y data de 1942 (Mason). Más recientemente, en 1950, Dixon diseñó un sistema circular bastante similar a los actuales. Unos años después, en 1954, se ideó un sistema para dejar bebida a las mascotas (Efford). Otros sistemas más recientes son los de Navarro, en 1981, que posee huecos para comida y bebida pero con baja capacidad, y el de Batson, en 1988, diseñado con engranajes y poleas.

Los sistemas electrónicos más recientes han incluido sistemas de seguimiento que combinan el rastreo en un lugar donde conviven diversos animales y cada uno tiene asociada una comida específica (Lewis & Ryland, 2002). La patente más reciente similar a los diseños actuales es un sistema circular con hora programable a través de un módulo integrado de control de tiempo e incluye un display LCD que facilita la operación (Krishnamurthy, 2010). Los sistemas comerciales (los más vendidos hoy en día) tienen por lo general un diseño circular con capacidad reducida (generalmente para comidas). Estos sistemas distinguen entre comida seca y húmeda. En todos ellos hay separación entre comedero y bebedero.

La evolución de las patentes queda reflejada en el Apéndice A clasificadas por autor e imagen.

Los tres diseños más comerciales hoy en día fueron analizados evaluando los puntos fuertes y débiles de cada uno de ellos. Las conclusiones fueron:

| | | | |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| |  |  |  |
| Ventajas (puntos fuertes) | <ul style="list-style-type: none"> - Varios días (muchas cantidad) - Diferentes tipos de comida - Cantidad regulable - Económico - Fácil limpieza | <ul style="list-style-type: none"> - Diferentes tipos de comida - Comida y bebida - Práctico - Fácil limpieza - No deslizante | <ul style="list-style-type: none"> - Varios días (muchas cantidad) - Bueno para regular la cantidad - Facilidad para comer |
| Inconvenientes (puntos débiles) | <ul style="list-style-type: none"> - Espacio ocupado - Dificultades para comer (espacio reducido) - Facilidad para que el perro pulse los botones | <ul style="list-style-type: none"> - Quebradizo - Imposibilidad de separar la comida (todo abierto) - Caro - Dificultades para comer | <ul style="list-style-type: none"> - Muy grande - Perros pueden ver la comida - Diseño - Espacio - Caro |

Tabla 1- Comparación diseños comerciales

2.2 Diseño del sistema mecánico

En el sistema mecánico se considerará especialmente el diseño de los engranajes (la velocidad, los tipos de engranajes usados y el momento ejercido por ellos). El propósito de los engranajes usados es la posibilidad de transmitir potencia con un alto rendimiento posibilitando la transmisión entre diferentes ejes. Además, es un sistema barato y simple.

2.3 Métodos de diseño del producto

Los métodos de diseño del producto que se han seguido están basados en la obra de Ulrich and Eppinger (2008), 'Product design and development', y se detallan a continuación:

1) Planificación del producto

El primer paso en el diseño del producto fue definir una planificación de todas las etapas, hitos, tareas y trabajos. Esto se hizo a través de un Diagrama de Gantt, un Time Plan y un Registro de Riesgos (Apéndices B, C y D). También fue definida la Declaración de Trabajo (donde se definieron todos los pasos) y se realizó un borrador de la Revisión de la Literatura.

2) Identificación de las necesidades del cliente

Una vez que el plan fue definido, se identificaron las necesidades del cliente. Los métodos que fueron seguidos para la captura de la información fueron:

- Encuestas a tiendas especializadas y dueños de perros para detectar las necesidades y características esenciales del sistema.
- Búsqueda de información tanto en libros de diseño como técnicos sobre sistemas electro-mecánicos, placa electrónica con un microcontrolador y su lenguaje de programación. Además, los sistemas actuales y las ideas patentadas fueron investigadas.

3) Especificación del producto

El próximo paso en el diseño del producto fue definir las especificaciones del producto, identificando y detallando los requerimientos dependiendo de su importancia.

Las especificaciones del producto (donde M significa los requerimientos que el proyecto debe tener, S los requerimientos que debería tener, C los requerimientos que podría tener y W los requerimientos que no tendrá) se detallan en el Apéndice E.

4) Generación del concepto

Se realizó una "tormenta de ideas" y múltiples bocetos fueron producidos y analizados. Con todas esas ideas el producto se pensó y diseñó tratando de cubrir todos los requerimientos. También se hicieron los cálculos necesarios para focalizar el diseño y evitar posteriores errores.

3 Metodología

3.1 Captura de requerimientos

3.1.1 Encuestas a propietarios de perros y tiendas especializadas

Se preparó una encuesta tratando de cubrir los aspectos más útiles en el menor periodo de tiempo (Glover, 2013). Para hacer una encuesta efectiva y rápida se utilizaron dos tipos de preguntas, siendo el tiempo estimado de respuesta de todas las preguntas menor a cinco minutos.

- En primer lugar, preguntas de elección múltiple. Con ellas se examinó el número de veces que se alimentaba a los perros, la cantidad y el tipo de comida y el almacenamiento de la misma dependiendo de la raza de sus perros (la cantidad de comida fue dividida en cantidades reguladas). También se preguntó sobre el alimentador automático que ellos tenían en casa (en caso de que lo tuvieran) o en la tienda, preguntando por el nombre, el precio que pagaron y lo que influenciaría la compra.
- Por otra parte, con preguntas abiertas se obtuvo información sobre qué impedía la compra de uno de estos sistemas, el máximo periodo de tiempo que dejarían comida al perro, cuánto pagarían por el alimentador y finalmente un pequeño análisis de los aparatos comerciales valorando el precio y las características de cada uno.

La encuesta fue realizada a siete personas (5 propietarios y 2 tiendas especializadas), dando la misma importancia a ambas. La encuesta que se realizó se adjunta en el Apéndice F.

3.1.2 Utilidad de la encuesta en el diseño

Los resultados de la encuesta fueron útiles para el diseño del producto, extrayendo la siguiente información:

- La raza y tamaño del perro para el que se dirigiría el sistema.
- El precio que se pagaría por el alimentador y el sistema tuviera mercado.
- El tamaño del contenedor.

3.1.3 Determinación del tamaño de perros para el que se dirige el sistema

Es posible clasificar las razas de perros en cinco grupos: muy pequeño, pequeño, mediano, grande y muy grande. Clasificando los perros por su peso:

- Muy pequeño
 - o Altura: 13 – 29 cm.
 - o Peso: 2 – 6 kg.
- Pequeño
 - o Altura: 30 – 42 cm.
 - o Peso: 7 – 15 kg.
- Mediano
 - o Altura: 43 – 56 cm.
 - o Peso: 16 – 27 kg.
- Grande
 - o Altura: 57 – 64 cm.
 - o Peso: 28 – 37 kg.
- Muy grande:
 - o Altura: 65 – 79 cm.
 - o Peso: 38 – 80 kg.

El sistema fue diseñado para perros pequeños y medianos debido a la facilidad de almacenamiento de la comida. El sistema también es válido para razas muy pequeñas, aunque resultaría demasiado grande y un gran número de comidas serían almacenadas. Acorde a Lewis, Morris y Hand (1987) el sistema será válido para las siguientes razas:

- Muy pequeño
 - o Border Terrier: 5 – 6.5 kg.
 - o Yorkshire Terrier: 4 kg.
- Pequeño
 - o English Cocker Spaniel: 12 – 15 kg.
 - o Fox Terrier: 7 – 8 kg.
 - o Shih Tzu: 5.5 – 7 kg.
 - o Skye Terrier: 11.4 kg.
- Mediano
 - o Bulldog: 18 – 23 kg.

- Bull Terrier: 23 kg.
- Cavalier King Charles Spaniel: 16 – 23 kg.
- Chow Chow: 27 kg.
- Dalmatian: 21 kg.
- English Springer Spaniel: 14 – 18 kg.

3.1.4 Información de las necesidades de estos tipos de perros

Un perro come normalmente cada día la cantidad de comida equivalente al 3% de su peso (Remenyi, 2013). El peso del perro para el cual el sistema será dirigido estará en el rango de 4 – 27 kg, por lo que la comida para cada día estará en el rango de 100 – 800 g.

3.2 Lluvia de ideas

3.2.1 Generación de ideas

Se generaron varias posibilidades y se diseñaron diferentes bocetos reflejados en el Apéndice G.

3.2.2 Análisis de ideas

Estas ideas fueron útiles para focalizar el diseño. Las ventajas e inconvenientes de cada sistema fueron analizadas.

El sistema más apropiado para dar al perro la cantidad exacta de comida sería el Boceto 3, que cuenta con un actuador lineal eléctrico que impulsa la comida. La desventaja de este diseño es el alto precio que tendría tanto el sistema como la producción de un prototipo.

Otra posibilidad sería una puerta basculante como se muestra en el Boceto 2, pero se encontró el inconveniente del apoyo del sistema incluyendo la puerta, el eje y los registros de este eje.

El Boceto 4 fue pensado siguiendo la idea del Boceto 2, intentado evitar el problema comentado en dicho diseño. La desventaja de este sistema sería la inviabilidad o impracticabilidad de producirlo.

Finalmente, el sistema diseñado y el prototipo construido fueron dirigidos siguiendo la idea que muestra el Boceto 1 pero cambiando la correa y el molde por:

- Engranajes cónicos debido al menor precio y la facilidad de producirlos en el sistema diseñado.

- Dos piezas manufacturadas (una fija y una rotatoria) para el prototipo construido.

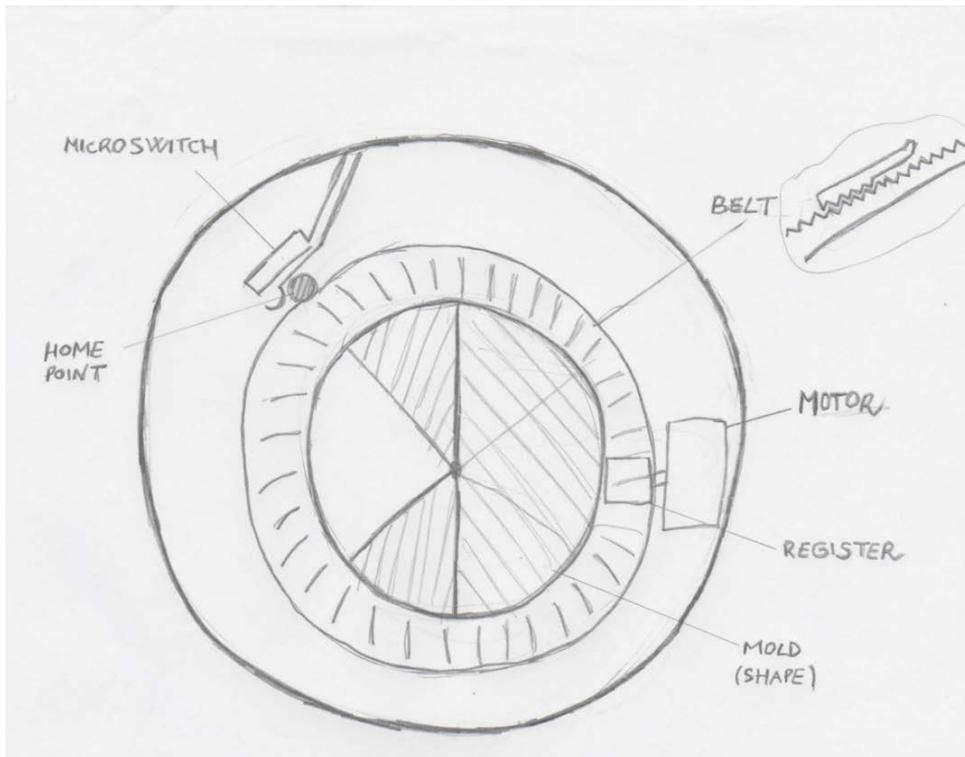


Figura 1- Boceto 1

3.3 Simulación

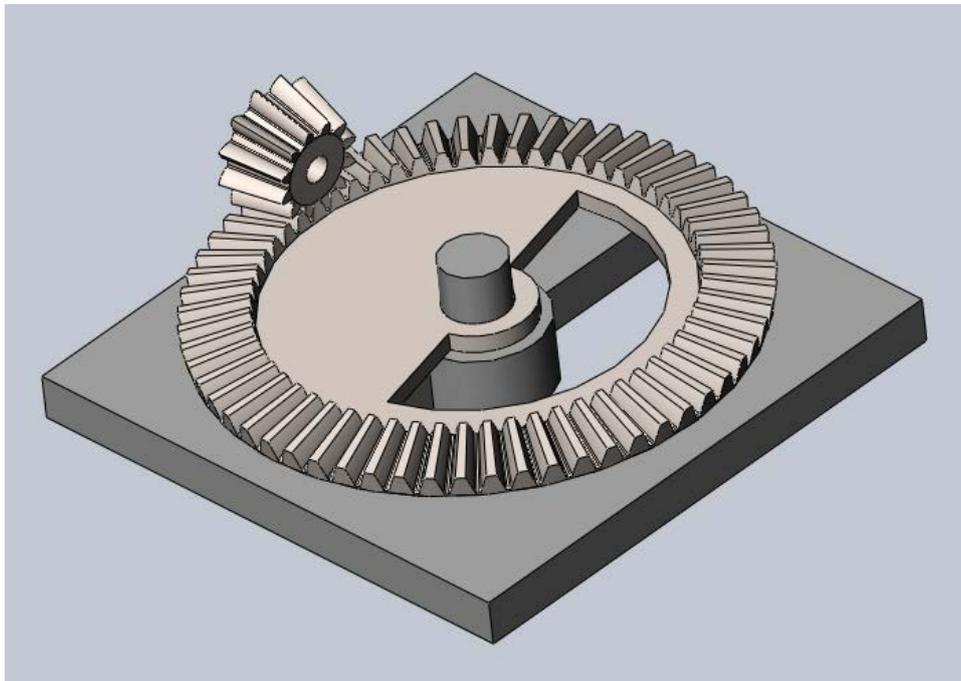


Figura 2- Diseño y simulación del sistema

Un diseño simple y esquemático fue producido en SolidWorks 2013, y es el que se muestra en la imagen superior. Este diseño fue simulado con dos engranajes cónicos, considerándose la mejor solución debido a la facilidad de manejar y manipular el motor sin afectar a la comida.

La corona del engranaje fue diseñada con un agujero en el centro para pasar a través de él un eje que contenía un plato inferior. El propósito de dicho plato era guiar el movimiento y la apertura del contenedor.

La corona y el plato fueron producidos con un agujero semicircular para dejar que la comida cayera cuando ambos coincidían. En la simulación se fijó el piñón y era la corona la que giraba alrededor del plato. La velocidad fue ajustada para dejar caer la cantidad de comida adecuada para una comida con dos alternativas diferentes:

- Girar continuamente a velocidad baja permitiendo que la comida cayera durante el movimiento rotatorio.
- Girar a velocidad alta hasta que los dos agujeros coincidían y detener el movimiento hasta que la cantidad de comida deseada cayera.

3.4 Estimación de los requisitos del sistema

3.4.1 Diseño del contenedor

Una vez determinada la especificación de peso de los perros a los que se dirige el sistema es posible determinar la cantidad de comida que será almacenada en el contenedor.

Basado en los resultados de la encuesta e información recabada de diversa bibliografía (Remenyi, 2013; Paretts, 2012; Saling, 2013), fue concluido que los perros pequeños y medianos comen dos o tres veces por día.

Para calcular la cantidad de comida que ha de ser almacenada fueron considerados cuatro días, tres comida por día y cantidades de 125 g.

$$\text{Cantidad de comida almacenada} = 4 \text{ días} \times 3 \text{ comidas} \times 125 \text{ g} = 1,5 \text{ kg}$$

La densidad aproximada de la comida de perro es sobre $250 - 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Pedigree 2012), por lo que el volumen se calcularía como:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow 250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{1,5 \text{ kg}}{V} \Rightarrow V = 0,006 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta tanto motivos de fabricación como de funcionalidad es conveniente el uso de un contenedor tipo tolva debido a una mejor caída de la comida. De este modo la comida es conducida al agujero por el que ha de caer.

Así pues se determinó un contenedor con forma troncocónica, donde:

- r_1 es el radio mayor
- r_2 es el radio menor
- h es la altura

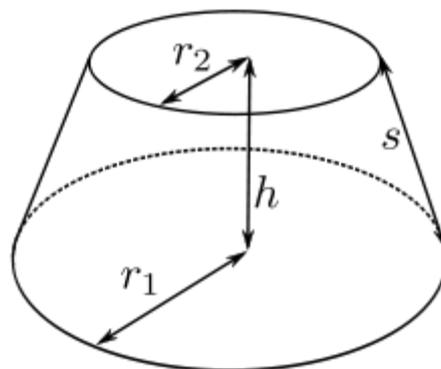


Figura 3- Forma troncocónica

El volumen de un contenedor con esta forma es:

$$V = \frac{h \pi}{3} \times (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)$$

Las 3 variables (h , r_1 y r_2) eran grados de libertad en el diseño teórico, siendo el único dato de partida el volumen a almacenar en el contenedor.

Se fijó una altura de $h = 20 \text{ cm}$ en base a disponibilidad y pruebas y se hicieron distintos ensayos hasta determinar las medidas más apropiadas para el contenedor. De este modo, los valores obtenidos fueron:

$$r_1 = 7 \text{ cm y } r_2 = 12 \text{ cm}$$

3.4.2 Selección del motor

Lo primero que cabe destacar en la selección del motor es que la potencia en este caso no es condicionante, ya que la velocidad angular necesaria es muy baja y además es previsible que el par motor requerido también sea bajo.

La expresión de potencia es:

$$P = \Gamma \times \omega$$

donde:

- P es la potencia (en W)
- Γ es el par motor (en $\text{N} \cdot \text{m}$)
- ω es la velocidad angular (en rad/s)

A partir de las simulaciones se estima que la velocidad angular para que caiga la cantidad de comida correcta deberá ser baja y en cualquier caso el tiempo necesario para completar una revolución estaría comprendido entre 10 y 20 segundos, por lo que se considerará un tiempo medio de 15 segundos. De este modo la velocidad angular es:

$$\omega = \frac{2 \pi \text{ rad}}{15 \text{ s}} = 0.418 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La 2ª ley de Newton dice que el sumatorio de par aplicado a un sistema en rotación es igual a la inercia multiplicada por la aceleración angular, es decir:

$$\sum \Gamma = I \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

donde el balance de pares en este caso es igual al par motor menos el par resistente, el cual proviene de la fricción entre las partes mecánicas, es decir:

$$\sum \Gamma = \Gamma_{motor} - \Gamma_{resistente}$$

Y debido a que:

$$\Gamma_{resistente} = fr \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

donde fr es el coeficiente de fricción, por lo que la ecuación resultante es:

$$\Gamma_{motor} = I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + fr \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

Esta ecuación puede ser simplificada asumiendo que el proceso transitorio es de corta duración y, por lo tanto, no es determinante a la hora de calcular la potencia del motor y por consiguiente el par. Al despreñar el transitorio en la ecuación anterior desaparecerían los términos de aceleración y, por lo tanto, la ecuación resultante sería:

$$\Gamma_{motor} \approx fr \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

De este modo, las condiciones para la selección del motor son:

- El par que tiene que hacer el motor ha de ser mayor o igual al par resistente o de fricción:

$$\Gamma_{motor} \geq \Gamma_{fricción} = fr \cdot \omega_{máx}$$

- La potencia que ha de suministrar el motor ha de ser mayor o igual al máximo del producto del par por la velocidad angular:

$$P_{motor} \geq (\Gamma \cdot \omega)_{max} \approx \Gamma_{fricción} \cdot \omega_{máx} = (fr \cdot \omega_{máx}) \cdot \omega_{máx} = fr \cdot \omega_{max}^2$$

Debido a que los fabricantes de motores eléctricos de pequeña potencia no suelen proporcionar los coeficientes de fricción del motor, se ha buscado alguna referencia para poder estimar este coeficiente, seleccionándose el ensayo Friction Effect Analysis of a DC Motor (Virgala, Frankovský & Kenderová, 2013), publicado en American Journal of Mechanical Engineering (se muestra en el Apéndice).

En dicho ensayo el par de fricción en régimen permanente es:

$$\Gamma_{fricción} = 1,5 \cdot 10^{-3} N \cdot m$$

La velocidad angular en dicho régimen es:

$$\omega = \frac{30 \text{ rad}}{2 \text{ s}} = 15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Por lo que el coeficiente de fricción sería:

$$fr = \frac{\Gamma_{fricción}}{\omega} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} N \cdot m}{15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{N \cdot m}{\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

Por lo tanto, el par necesario será:

$$\Gamma_{motor} \geq fr \cdot \omega_{max} = 1 \cdot 10^{-4} \frac{N \cdot m}{\frac{\text{rad}}{\text{s}}} \cdot 0,418 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 4,180 \cdot 10^{-5} N \cdot m$$

Respecto a la potencia requerida, se puede comprobar que es muy pequeña (del orden de milivatios), por lo que dado que los motores eléctricos de baja tensión proporcionan potencia del orden de Vatios no va a ser la potencia requerida una restricción de diseño.

Para determinar la validez del motor se harán pruebas en el prototipo siendo el mismo escogido en base a estos cálculos. Otros criterios de selección del motor serán el bajo costo y la fácil disponibilidad.

En base a los criterios anteriores, se ha escogido un motor cuyas características mecánicas son:

$$\Gamma_{motor} = 58,8 g \cdot cm$$

$$\Gamma_{motor} = 58,8 g \cdot cm \cdot 9,8 \frac{N}{kg} \cdot \frac{1}{1000} \frac{kg}{g} \cdot \frac{1}{100} \frac{m}{cm} = 5,762 \cdot 10^{-3} N \cdot m$$

$$P_{motor} = \varepsilon \cdot P_{eléctrica} = 0,6194 \cdot 5,75 W = 3,561 W$$

Este motor cumple la condición, ya que:

$$\Gamma_{motor} = 5,762 \cdot 10^{-3} N \cdot m \geq 4,180 \cdot 10^{-5} N \cdot m$$

Además, la tensión de alimentación deberá ser compatible con el resto del sistema electrónico del prototipo.

3.5 Prototipo construido

Un prototipo simple fue producido para entender los aspectos principales y el principio de funcionamiento de este sistema.

Debido a la impracticabilidad e inviabilidad de producir un prototipo con engranajes cónicos, dicho sistema se construyó con dos piezas de acero templado con agujeros circulares por los que pudiera caer la comida.

En primer lugar, la forma del sistema fue diseñada en SolidWorks 2013 con los requerimientos necesarios:

- El contenedor en la parte superior con forma de cono truncado.
- Una pestaña (brida) con diámetro diferente que sirviera de apoyo a la pieza guía (por encima de la cual giraba la pieza rotatoria).
- Un agujero en la parte inferior con las medidas requeridas para dejar caer la cantidad de comida apropiada.
- Un pequeño agujero circular en el centro para pasar el eje del motor a través de él.
- Una cavidad en el lado opuesto al agujero para sostener el motor.

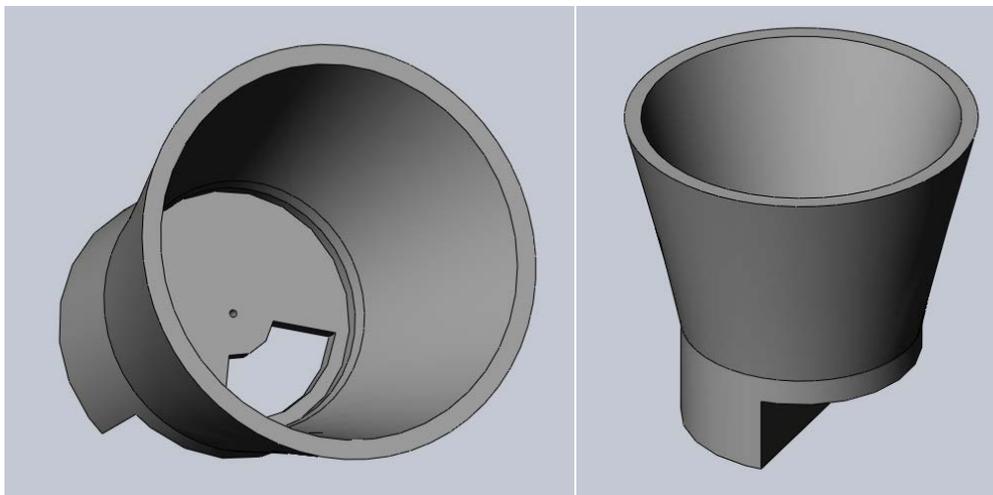


Figura 4- Diseño del contenedor

El primer requerimiento era conseguir un contenedor que se ajustara a las características necesarias. Tanto el contenedor teórico como el realizado tenían unas medidas similares para el almacenamiento de la comida, con una altura de 200 mm, un diámetro mayor de 175 mm y un diámetro menor de 100 mm.

Para evitar la producción del contenedor se utilizó un portalámparas con medidas similares para contener la comida. Este artículo tenía la forma deseada, un cono truncado, y cumplía el objetivo: guiar la comida al agujero diseñado y que cayera por gravedad. También era un artículo de bajo costo. El resto de piezas fueron manufacturadas en base a las medidas de este “contenedor”.



Figura 5- Recipiente usado

En la siguiente fotografía es posible ver el prototipo construido que se explica a continuación.

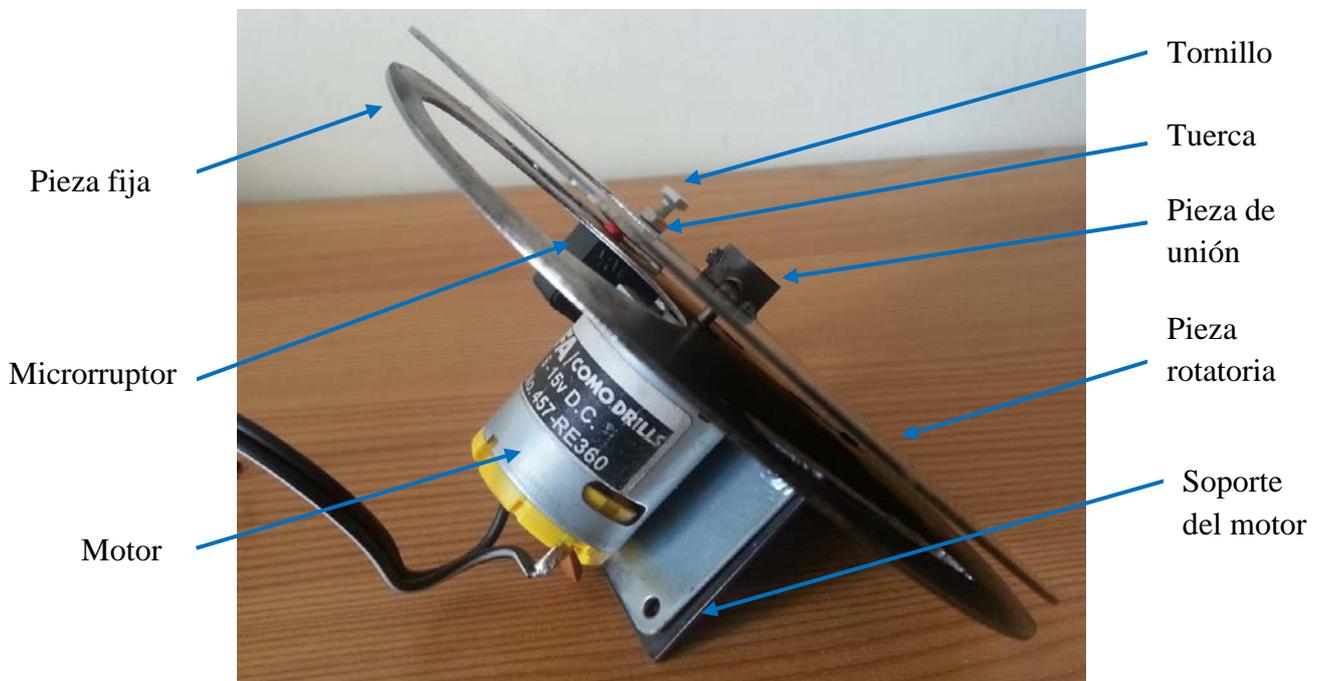


Figura 6- Prototipo construido

3.5.1 Parte mecánica

3.5.1.1 Piezas circulares fabricadas

Dos piezas circulares fueron producidas por una máquina cortadora láser de control numérico por ordenador (CNC – Computer Numerical Control).

Con respecto a la idea inicial se eliminó una pieza guía que orientara la pieza rotatoria y también se cambió la posición de las piezas.

Las ventajas de fabricar solamente dos piezas son:

- Se evitan los problemas entre partes (rozamiento, almacenamiento de comida...).
- Se reduce el peso.
- Se reduce el coste.

Estas piezas fueron fabricadas con acero templado, ya que es un material muy resistente, duradero y relativamente duro (120 HB). El espesor elegido fue el menor posible, 1 mm, para evitar un incremento del peso. El propósito de estas dos piezas es la caída de la comida cuando el usuario lo requiera y en la cantidad que desee.

Todas las piezas fueron diseñadas previamente en SolidWorks 2013, ya que la máquina láser cortadora CNC requería este tipo de archivo.



Figura 7- Máquina CNC fabricando las piezas

Para lograr este propósito cada una de las dos piezas tiene diferentes objetivos. En primer lugar, la pieza rotatoria situada en la parte superior del contenedor tiene dos requerimientos:

- Soportar la comida que está por encima.
- Girar por el interior del contenedor.

Esta pieza tiene un diámetro de 115 mm y un agujero circular con un diámetro de 45 mm. El diámetro de la pieza fue elegido en base a la medida del contenedor y el agujero fue diseñado para ser lo suficientemente grande y que cayera la cantidad de comida apropiada.

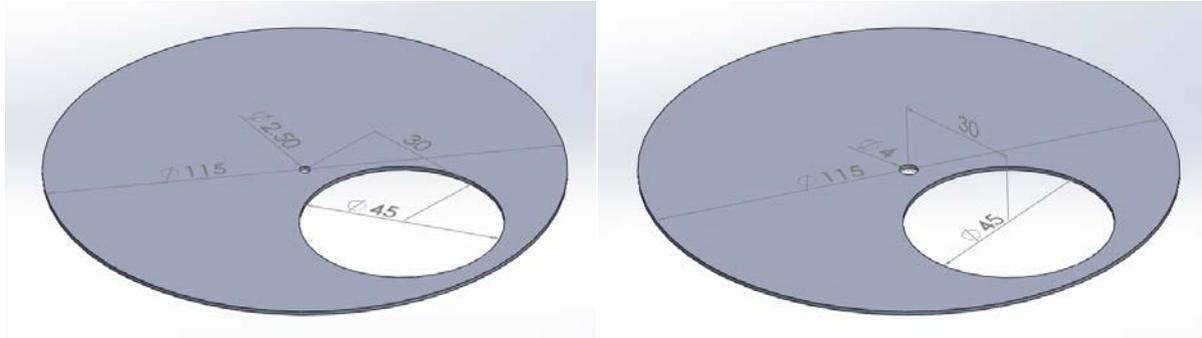


Figura 8- Piezas fabricadas

El diámetro del contenedor a esta altura es 117.5 mm y permite a la pieza girar alrededor de él sin fricción y que la comida no pueda caer por el espacio sobrante.

Dos problemas principales fueron considerados en el diseño:

- La comida no cayera al nivel inferior.

Este problema se solucionó usando un plato con un ángulo de 8°.

- Apelmazamiento de la comida.

Este problema fue resuelto diseñando el agujero lo suficientemente grande para que la comida no se apelmazara y cayera a través de él.

En segundo lugar, la pieza fija fue diseñada con la misma medida que la anterior y fue posicionada justo debajo. A diferencia de la pieza rotatoria, ésta tiene un agujero circular en el centro de la circunferencia con un diámetro de 4 mm para pasar el eje del motor sin hacer un ajuste preciso.

El movimiento rotatorio tiene el propósito de permitir el descenso de la comida cuando ambos agujeros están en la misma posición. Cuando la pieza superior gira y los agujeros están en diferente posición, el contenedor está cerrado y la comida no cae.

3.5.1.2 Pieza de unión fabricada

Para resolver el problema de conexión entre el eje del motor y la pieza rotatoria y transmitir el movimiento del motor se fabricó una pieza de unión.



Figura 9- Pieza de unión manufacturada

Esta pieza tiene diversas ventajas:

- En primer lugar, y principal ventaja, la posibilidad de reemplazar el motor si éste se rompiera sin consecuencias en el resto del sistema.
- La facilidad de ajuste a la medida del eje, pues sólo se requiere una simple llave Allen.



Figura 10- Ajuste del tornillo de la pieza de unión

- El material usado (como en el resto de piezas) es acero templado, ya que es barato, fácil de soldar y con la soldadura se asegura la transmisión del movimiento.

Esta pieza tiene un diámetro externo de 10 mm y un diámetro interno de 2.3 mm para hacer un ajuste preciso con el eje de 2.2 mm de diámetro. La altura de esta pieza es de 6 mm y la longitud del eje del motor que pasa hasta la mitad de esta pieza, 9.2 mm (la piezas descritas anteriormente que también pasan a través del eje del motor son de 1 mm cada una y, por tanto, hay 4.2 mm libres para la separación entre piezas). El agujero en un lado fue realizado para atornillar en el interior un tornillo de métrica 3.

La pieza de unión fue soldada en la parte superior de la pieza rotatoria y permite que el eje gire transmitiendo el movimiento sin deslizamiento, ya que el tornillo fija la pieza al eje. La ventaja de la soldadura es que confiere resistencia y dureza a la unión, siendo imposible la separación entre partes.

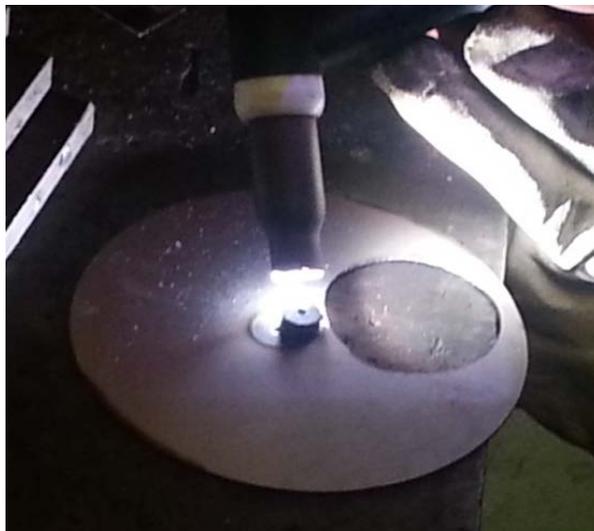


Figura 11- Soldadura de pieza de unión

El proceso de soldadura fue Soldadura de Arco de Gas Tungsteno (GTAW – Gas Tungsten Arc Welding). Las características de este proceso de soldadura se encuentran en el Apéndice H.

3.5.1.3 Soporte del motor

Una pieza soporte se fabricó para servir de apoyo al motor y mantenerlo unido a la pieza fija. El motor fue fijado a una chapa de metal con dos tornillos en la cara frontal. Otra chapa metálica con cuatro agujeros en la misma posición que la chapa metálica se hizo para atornillar el motor. Las medidas de la chapa metálica son 45 x 39 mm.

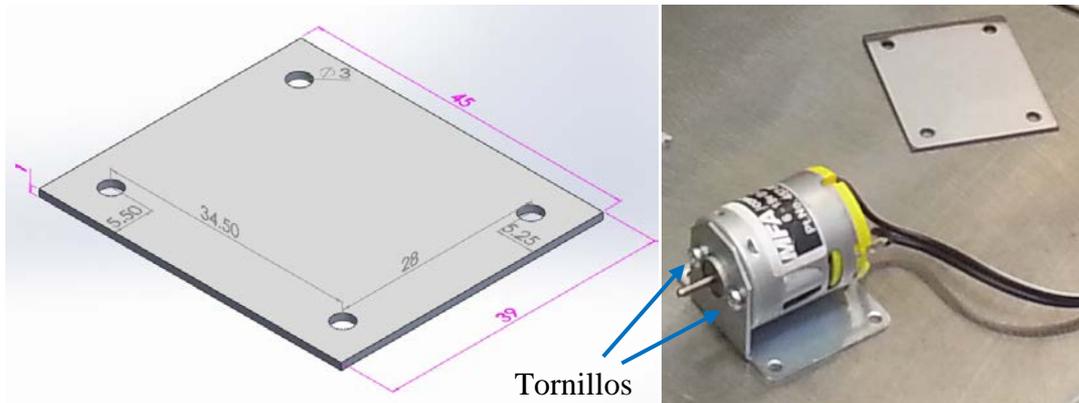


Figura 12- Soporte del motor

Este apoyo fue soldado a la pieza fija con el mismo procedimiento, soldadura TIG. En este proceso una pieza de metal con forma triangular (una escuadra) se usó para proveer más rigidez y estabilidad a la unión además de fijar la posición del motor.

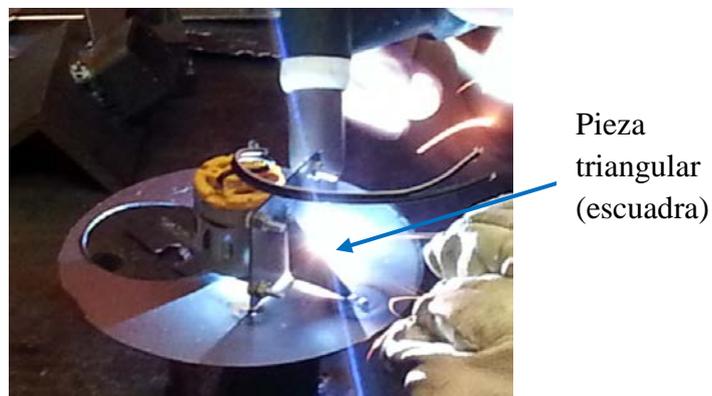


Figura 13- Soldadura del soporte

Los problemas de este procedimiento fueron:

- Deformación en la pieza fijada debido al calor durante el procedimiento de soldadura.
- Puntos de soldadura y exceso de material en la otra cara de la pieza fijada.

Para resolver estos problemas, la pieza fijada fue deformada a mano de la mejor manera posible y los puntos de soldadura y el exceso de material fueron limados con una limadora automática.

3.5.2 Parte electrónica

La parte electrónica tiene el objetivo de controlar el motor. Para lograrlo, el motor tiene que hacer girar a la pieza rotatoria hasta que el contenedor quede abierto, parar hasta que la cantidad de comida caiga y girar de nuevo para cerrar el contenedor.

Una placa microcontroladora “Arduino” fue escogida para ello debido a su bajo precio (el proyecto es especificado como de bajo costo) y su facilidad para programarla en lenguaje C o C++. Con este microcontrolador es posible controlar el motor y programar las horas a las que la comida tiene que caer.

3.5.2.1 Regulación de la velocidad del motor

En primer lugar se necesitan dos componentes:

- Una batería. Debido a uno de los riesgos definidos con anterioridad, el sistema es alimentado por baterías. La mayoría de los sistemas actuales son accionados por baterías porque previenen muchos de los posibles riesgos. La justificación del voltaje de la batería se realizará más adelante.
- Un soporte de batería con un interruptor de ON/OFF. Se utilizó para hacer más sencillo el proceso de montaje.
- El motor. Se escogió uno con 90 brackets que es capaz de operar entre 6 V y 15 V en DC. El eje del motor tiene un diámetro de 2.2 mm y una longitud de 9.2 mm.



Figura 14- Soporte de batería y motor empleados

La regulación de la velocidad del motor fue realizada con dos placas Arduino. Una “Arduino Uno” fue usada para controlar el circuito electrónico y una “Arduino Motor Shield” para mover el motor, regular su velocidad y la dirección de giro.

Debido a la especificación de voltajes de entrada recomendados para estas placas Arduino (entre 7 V y 12 V para la Arduino UNO y entre 5 V y 12 V para la Arduino Motor Shield), se escogió un voltaje de 9 V (teniendo en cuenta la disponibilidad de baterías estándar de 9 V y su menor precio con respecto a otros voltajes).



Figura 15- Arduino UNO y Arduino Motor Shield

Las tablas de características de la Arduino Uno y de la Arduino Motor Shield están en los Apéndices I y J. El diagrama para esta conexión es:



Las dos flechas representan que dos cables son requeridos para hacer esta conexión.

Para el diseño del programa se analizaron los requerimientos previamente definidos. El programa tenía los siguientes objetivos:

- Girar el motor en la dirección deseada a la velocidad requerida.
- Parar en la posición donde los agujeros coinciden.
- Girar de nuevo hasta que otra comida tuviera que ser entregada.

Con estas especificaciones se realizó un código de Arduino para girar el motor en sentido horario durante tres segundos, pararlo durante cinco segundos (para dejar el tiempo suficiente para que la comida cayera por gravedad) y girar el motor en sentido anti-horario hasta que otra comida fuera requerida. Este código fue comprobado e implementado en el motor y apareció un problema: el punto inicial y final de cada revolución eran diferentes, ya que el sistema no tenía un punto de referencia para empezar y finalizar el movimiento. El código de implementación está en el Apéndice K (Sarafan 2012).

Para resolver este problema el prototipo y el código se modificaron, incluyendo un microrruptor que sirviera de referencia para empezar y finalizar el movimiento.

En este código la dirección de avance es siempre la misma (el microrruptor lo requiere debido a las palancas que posee) y el motor gira hasta que el microrruptor es pulsado por primera vez, el cual se denominará punto de inicio. En este momento el motor para durante tres segundos, tras los cuales el motor gira hasta que dicho microrruptor es accionado de nuevo (se denominará punto de finalización del recorrido), quedando el contenedor cerrado. El código de implementación con múltiples comentarios para un fácil entendimiento está en el Apéndice L. El código fue depurado y comprobado.

3.5.2.2 *Microrruptor*

La solución con el microrruptor implicó:

- Colocación del microrruptor debajo de la pieza fija.
- Paso a través de la pieza fija de la palanca del microrruptor.
- Activación del interruptor pulsando la palanca desde la pieza rotatoria.
- Realización de un punto de referencia en la pieza rotatoria.

El microrruptor usado fue uno estándar de bajo coste con una palanca fabricada en termoplástico reforzado de vidrio para darle resistencia. El tamaño del cuerpo es 27.8 x 15.9 x 10.3 mm y su hoja de datos está en el Apéndice M.



Figura 16- Microrruptor

Las ranuras fabricadas en la pieza fija fueron hechas basadas en las medidas de la palanca del microrruptor. Las medidas de la ranura son 40 mm de longitud y 7 mm de anchura y la distancia al centro 42.5 mm. Estas ranuras fueron fabricadas haciendo pequeños agujeros con un taladro en esa zona y limando el material sobrante entre ellas. Este proceso fue usado

debido a la inviabilidad de sujetar la pieza en otra herramienta. Además, el pequeño espesor de dicha pieza impedía otro proceso de fabricación.



Figura 17- Ranuras para el microrruptor

Para activar el interruptor, un tornillo de altura ajustable fue usado, considerándola como la mejor solución. Ésta tiene varias ventajas:

- Fácil producción haciendo sólo dos agujeros en la pieza superior, la rotatoria.
- Colocación de una tuerca por encima y por debajo de la pieza rotatoria para facilitar el ajuste de la altura del tornillo.
- Bajo precio del tornillo y de las tuercas.

El microrruptor fue pegado por debajo de la pieza fija y en la mejor posición, siendo ésta determinada tras múltiples ensayos. La palanca fue deformada manualmente hasta obtener la mejor forma y que el tornillo pudiera pulsarla correctamente, y, consecuentemente, enviar una orden a la placa Arduino cuando el circuito es activado y desactivado. La fijación del microrruptor fue un proceso complejo porque la localización debía ser muy precisa para un correcto funcionamiento. Múltiples microrruptores fueron probados antes de la elección final.



Figura 18- Funcionamiento del microrruptor

4 Resultados y Discusión / Debate

4.1 Resultados de la encuesta

Analizando los resultados de la encuesta se concluyeron varios resultados:

- La mayoría de los usuarios alimentan a sus perros dos veces al día. Este hecho es consecuencia de las horas que están en casa, en las cuales pueden alimentar a sus mascotas.



Figura 19- Frecuencia de alimentación diaria

- La mayoría de propietarios dan de beber cinco veces al día. Generalmente los dueños dejan agua a sus perros para cuando ellos quieran.
- La mayoría de propietarios alimentan a sus perros con una cantidad de comida entre 100 – 250 g. Esto depende de la raza y del tamaño del perro.

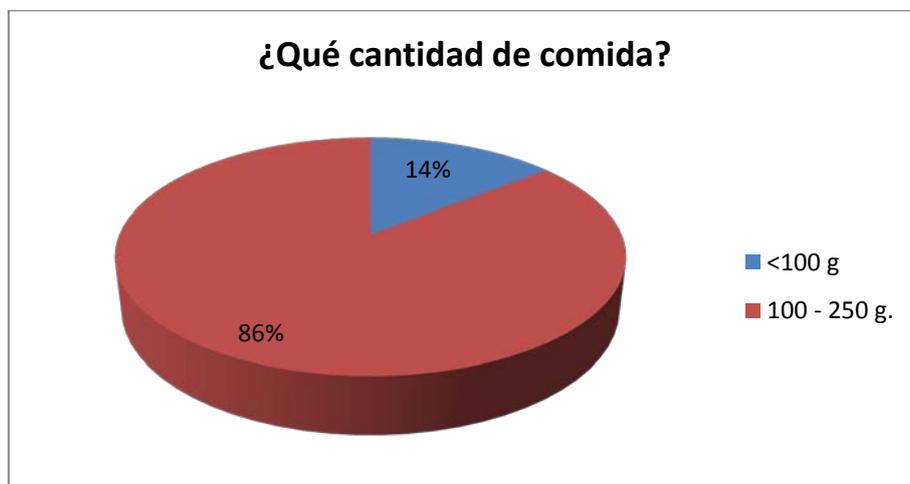


Figura 20- Cantidad de comida

- La mayoría de los propietarios alimentan a sus perros con comida seca. Los dueños suelen almacenar la comida en un lugar en seco y es este tipo de comida la más adecuada para evitar problemas de refrigeración. Por esta razón, los proveedores cada vez hacen más este tipo de raciones.



Figura 21- Tipo de comida

Con preguntas abiertas se obtuvieron otras dos conclusiones:

- Preguntando sobre cuánto tiempo la comida o el agua pueden ser dejados al perro la mayoría dijo que dos o tres días como máximo, excepto una persona que piensa que es posible dejarla durante una semana. La opinión generalizada es un día.
- Preguntando sobre cuánto pagarían la mayoría dicen que los precios actuales para estos sistemas son apropiados pero que pagarían sobre 50€ por un sistema común, excepto una persona que sólo pagaría 25€

Una comparación entre sistemas comerciales fue realizada. Los resultados se muestran en el Apéndice N.

4.2 Prototipo final

Debido a que el soporte del motor fue soldado a la pieza fija y la pieza rotatoria al eje del motor con la pieza de unión, el único proceso que tenía que realizarse era la localización de este ensamblaje en el contenedor.

El proceso de montaje fue simulado en SolidWorks para facilitar el entendimiento y comprobar teóricamente el funcionamiento del sistema.

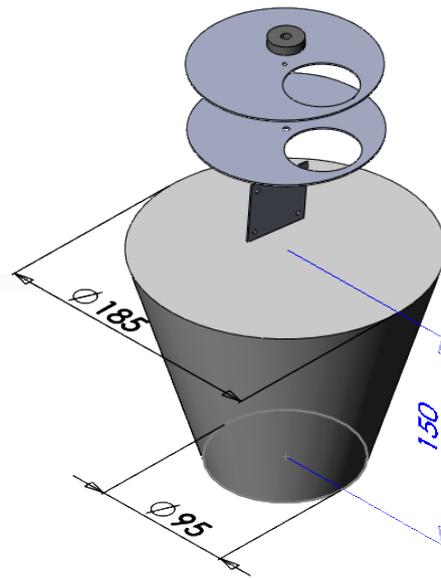


Figura 22- Proceso de montaje

Siguiendo este proceso de montaje se obtuvo el prototipo final que se muestra a continuación.

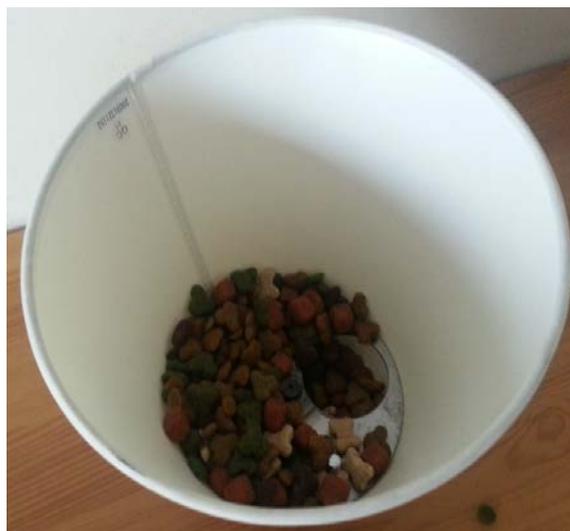


Figura 23- Montaje final

5 Conclusiones

Tras realizar tanto la parte teórica como la práctica de este proyecto, varias conclusiones pueden ser extraídas:

- En primer lugar, el diseño de un producto y su desarrollo es un proceso complejo que tiene que ser hecho cuidadosamente y exhaustivamente analizando el mercado y siguiendo unos pasos determinados para lanzar el producto con ciertas garantías de éxito.
- El diseño teórico y el práctico no son iguales debido a que hay características que tienen que ser evaluadas y analizadas (precio, material o función) y que las posibilidades disponibles son diferentes de las deseadas. Consecuentemente, el producto ha de ser adaptado a este aspecto.
- Es probable que el producto tenga algunos defectos que se den a conocer cuando la construcción está produciéndose y es difícil evitarlos en la etapa de planificación. Es importante estar preparado para resolverlos y tener alternativas para alcanzar el éxito en el proyecto.
- En relación a este proyecto en concreto, el sistema de un alimentador automático de perros es un artículo útil para propietarios de perros, ya que evita preocupaciones sobre cuándo tienen que alimentar a sus perros. Otro aspecto, y más importante, es que mejora la salud de dichos animales.
- Para construir el sistema conceptos mecánicos y electrónicos tienen que ser relacionados y combinados.
- Usando y aprovechando una técnica simple como es la fuerza de la gravedad es posible alimentar al perro. Esta solución es además la mejor ya que la comida es almacenada en un nivel alto y es presentada al perro a una altura baja para facilitarle la consumición.
- Todos los objetivos fueron logrados. Los requerimientos de usuario para el sistema fueron capturados y analizados (1er objetivo), el sistema electro-mecánico fue diseñado y comprobado (2º objetivo) y un prototipo fue construido y evaluado (3er objetivo).
- Este proyecto ha sido un claro ejemplo de que con un presupuesto bajo es posible construir y ensayar un prototipo simple antes de la construcción del sistema final (por ejemplo usando un portalámparas haciendo la función de contenedor).

6 Referencias

- Batson, D.B. (1988) *Automatic Dog Feeder*. European Patent EP 4,782,790 – 1988-11-08
- Dixon, E.B. (1950) *Dog Feeding Device*. European Patent EP 2,500,243 – 1950-03-14
- Efford, J.T. (1954) *Fluid Dispensing Package With*. European Patent EP 2,741,405 – 1956-11-10
- Glover, P.V. (2013) '*Building surveys*' [online] 8th edition. Ed. by Butterworth-Heinemann.
- Highway, B. (1971) *Automatic Selective Animal Feeder*. European Patent EP 3,557,757 – 1968-07-10
- Hills Pet. 2013. *Your Overweight Dog: When Bigger Isn't Better*. [Online]. [Accessed on 2nd February 2014]. Available from: <http://www.hillspet.com/dog-care/your-overweight-dog-when-bigger-isnt-better-mature-adult-dog.html>
- Houghton, P.S. (1970) '*Gears, spur, helical, bevel, internal, epicyclic and worm*' Ed. by Technical Press.
- Kenyon, W. (1987) '*Basic Welding and Fabrication*'. Ed. by Harlow: Longman Scientific & Technical, 89-97
- Krishnamurthy, S. (2010) *Automatic Pet Feeder*. European Patent EP 7,650,855 – 2010-01-26
- Lewis, B. & Ryland, S (2002) *Pet Feeding System and Method Using Same*. European Patent EP 6,349,671 – 2002-02-26
- Lewis, L.D., Morris, M.L. and Hand, M.S. *Small Clinical Nutrition III*. Topeka, Kansas, Mark Morris Associates, 1987. [Online]. [Accessed on 16th February 2014]. Available from: <http://www.mismascotas.cl/perro/pesoperro.htm>
- Mason, J. (1942) *Automatic Feeding Device*. European Patent EP 2,298,955 – 1940-11-10
- Navarro, J. (1981) *Automatic Dog or Cat Feeder*. European Patent EP 4,248,175 – 1981-02-03
- Paretts, S. 2012. *The Daily Puppy website*. [Online]. [Accessed on 18th January 2014]. Available from: <http://dogcare.dailypuppy.com/little-dog-eat-2857.html>
- Pedigree. 2012. *Feeding a dog*. [Online]. [Accessed on 14th December 2013]. Available from: <http://uk.pedigree.com/feedingadog/feeding-a-dog>

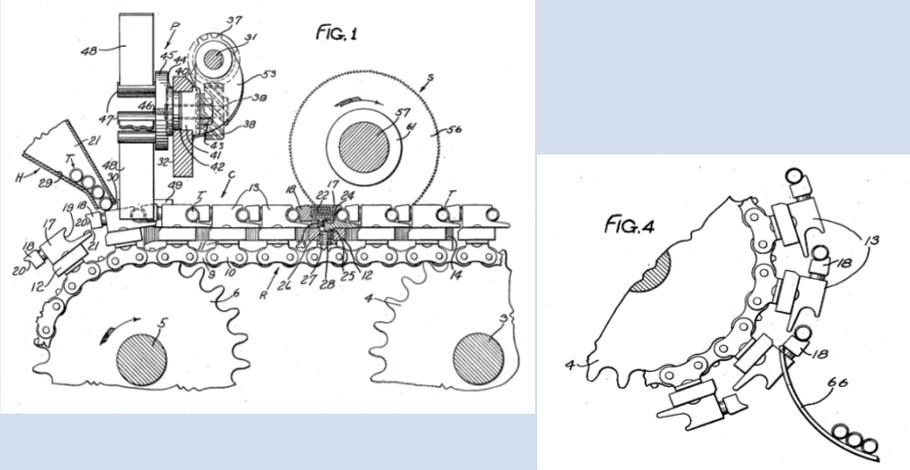
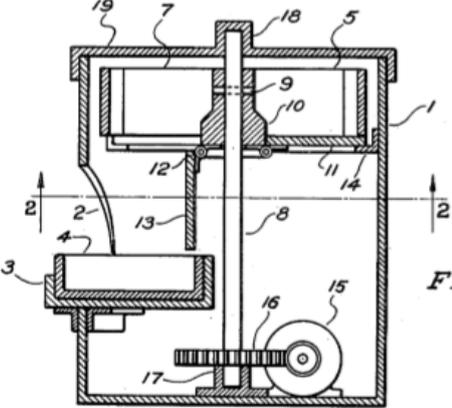
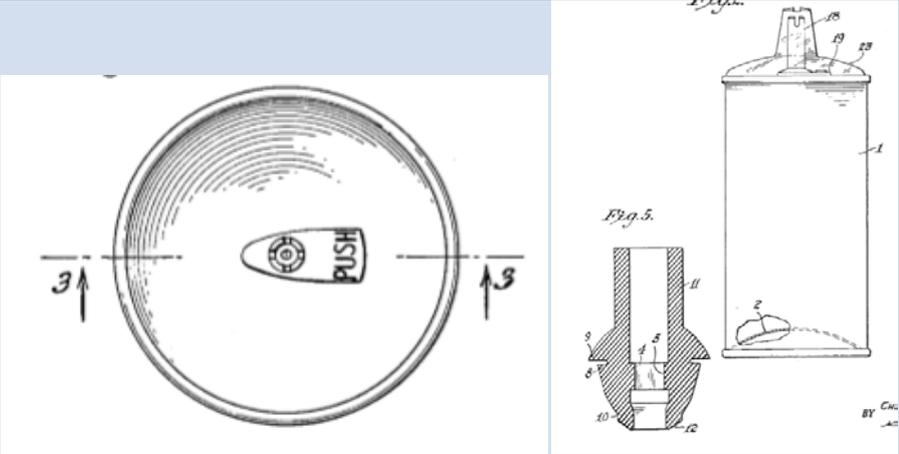
Remenyi, R.L. 2013. *Ehow website*. [Online]. [Accessed on 5th March 2014]. Available from: http://www.ehowenespanol.com/cuanto-alimento-darle-perro-base-peso-manera_155612/

Saling, J. 2013. *WebMD website*. [Online]. [Accessed on 25th November 2013]. Available from: <http://pets.webmd.com/ask-pet-health-11/dog-feeding>

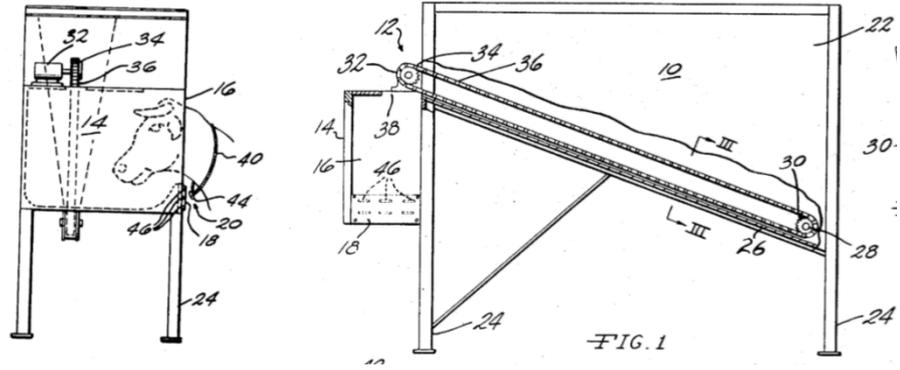
Ulrich, K.T., Eppinger, S.D. (2008) '*Product design and development*'. Ed. by McGraw-Hill, 4th edition.

Vause, W. A. (2002) '*The Art of Welding*'. Ed. by Special Interest Model Books

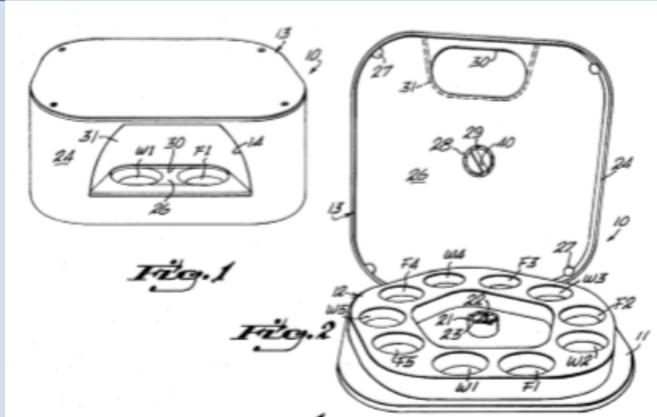
Apéndice A – Autores y Patentes

| Autor y Fecha | Imagen |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Mason, 1942 |  |
| Dixon, 1950 |  |
| Efford, 1950 |  |

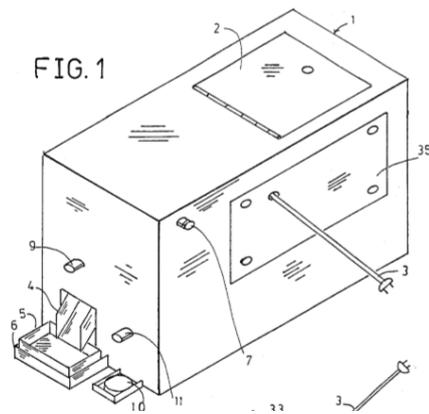
Highway, 1971



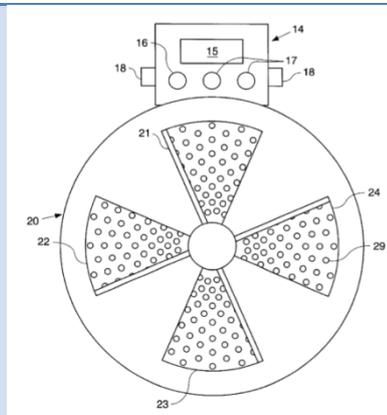
Navarro, 1981



Batson, 1988



Lewis et al., 2002



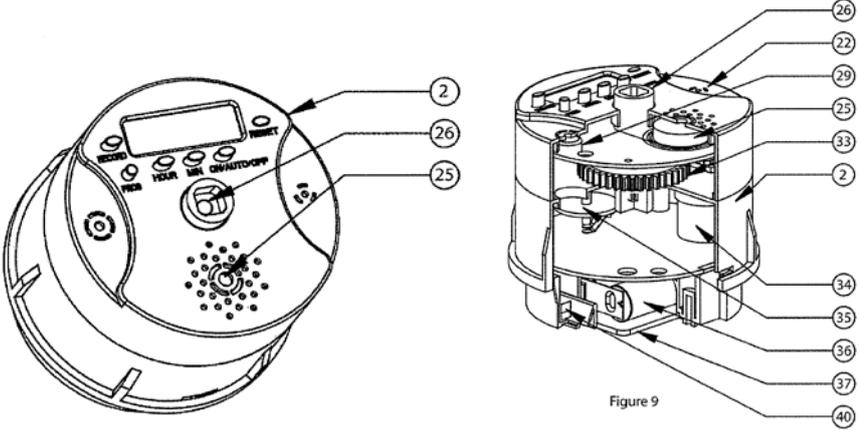
| | |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Krishnamurthy, 2010</p> |  <p>The drawing shows a top-down view of a circular pet feeder with a control panel on the left side. The panel includes a digital display and several buttons labeled 'POWER', 'MENU', 'ON/OFF', 'ON/AUTO/OFF', and '1-5'. A speaker grille is located at the bottom center. To the right is a cross-sectional view of the internal mechanism, showing a hopper, a rotating wheel, and a dispensing chute. Various components are labeled with circled numbers: 2, 25, 26, 22, 29, 33, 34, 35, 36, 37, and 40.</p> <p>Figure 9</p> |
| <p>Andrew Jones, 2013</p> |  <p>A photograph of a dark green, bowl-shaped automatic pet feeder. It has a black lid with a control panel on the front side, featuring several buttons and a small display. The feeder is filled with brown kibble.</p> |
| <p>Trixie, 2013</p> |  <p>A photograph of a white and black automatic pet feeder. The lid is open, revealing a compartment filled with kibble. The feeder has a simple, functional design.</p> |
| <p>Andrew Jones, 2014</p> |  <p>A photograph of a tall, grey automatic pet feeder. It has a large, clear hopper at the top and a black dispensing tray at the bottom. The brand name 'Andrew Jones' is visible on the front.</p> |

Tabla 2- Autor y Patente

Apéndice D – Registro de riesgos

| Estructura de Descomposición del Trabajo | Descripción | Objetivos | Riesgo | Resolución |
|------------------------------------------|------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.3.2 | Parte 3.3 | 3 | Enfermedad, lesión o problemas de salud causados al perro. | Sustitución de la red eléctrica por baterías/pilas y tomar cuidado especial con componentes que puedan ser desprendidos e incluso incluir un detector de metales. |
| 3.3.2 | Parte 3.3 | 3 | No disponibilidad de perro para comprobar el sistema. | No hacer el test. |
| 2 | Parte 2 | 2 | No disponer de conocimientos previos de como diseñar el sistema. | Aprender procedimientos de diseño y buscar información en libros, internet y ayuda del profesor. |
| 2.1, 2.3, 2.5, 3.2 | Partes 2 and 3 | 2 and 3 | No disponer de material o equipo para diseñar o construir el sistema. | Proveer lo antes posible el material o equipo necesario para el diseño o la construcción. |
| 3.2 | Subconjunto 3 | 3 | Alto coste del sistema. | Evitar un alto coste de componentes e intentar reemplazar los más caros por otros más baratos que hagan la misma función. |
| 3.2 | Subconjunto 3 | 3 | Retraso en la construcción del prototipo. | Intentar completar el diseño final una semana antes de la fecha de entregar. |
| - | Todo el Proyecto | Informe | Pérdida de los datos del Proyecto. | Copias de seguridad diaria de los datos. |

Tabla 3- Registro de Riesgos

Apéndice E – Especificaciones del producto

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|---|
| El alimentador automático para perros necesita: | |
| Ser seguro | M |
| Ser ético | M |
| Seguir los pasos de diseño y desarrollo de sistemas | M |
| Ser programable por el usuario las veces que desea comida | M |
| Fácil de programar por el usuario | M |
| Estar acabado para principios de Mayo | M |
| Crear un prototipo | M |
| Informado de los resultados de encuestas de potenciales clientes | M |
| Alimentado por batería | M |
| Estar disponible para Border Terrier | M |
| Estar disponible para Yorkshire Terrier | M |
| Estar disponible para English Cocker Spaniel | M |
| Estar disponible para Fox Terrier | M |
| Estar disponible para Shih Tzu | M |
| Estar disponible para Skye Terrier | M |
| Estar disponible para Bulldog | M |
| Estar disponible para Bull Terrier | M |
| Estar disponible para Cavalier King Charles Spaniel | M |
| Estar disponible para Dalmatian | M |
| Estar disponible para English Springer Spaniel | M |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|---|
| Estar disponible para Chow Chow | S |
| Ser económico | S |
| Ser programado con Arduino | S |
| Ser programable la cantidad de comida por el usuario | S |
| Ser avisado por una señal de aviso al usuario cuando la comida esté baja | S |
| Ser por temporizador de arena (gravedad) | C |
| Ser por sistema de engranajes (ruedas dentadas) | C |
| Ser por correa mecánica | C |
| Ser por temporizador mecánico | C |
| Tener un mecanismo para abrir la puerta | C |
| Llamar al perro a través de un mensaje grabado | C |
| Ser ensayado en un perro real | C |
| Usar Proteus | C |
| Ser para comida y bebida | W |
| Ser usados propietarios de perros en la presentación | W |
| Ser enchufado a la corriente | W |

Tabla 4- Especificaciones del producto

Apéndice F – Encuesta

Encuesta de Alimentación de Perros

1. ¿Tienes algún tipo de estos perros?
 - Labrador Retriever
 - English Cocker Spaniel
 - English Springer Spaniel
 - German Shepherd
 - Staffordshire Bull Terrier
 - Cavalier King Charles Spaniel
 - Golden Retriever
 - West Highland White Terrier
 - Boxer
 - Border Terrier
 - Rottweiler
 - Yorkshire Terrier
 - Bulldog
 - Dobermann Pinscher
 - Bull Terrier
 - Shih Tzu

| Perro 1 | | | | | |
|---------------------------------------------|-----------|--------------|-----------------|----------------|---------|
| ¿Cuántas veces al día alimentas a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cuántas veces das de beber a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cada cuántas horas? | Each 4 h. | Each 8 h. | Each 12 h. | Each 24 h. | |
| ¿Qué cantidad de comida? | < 100 g. | 100 - 250 g. | 250 g. - 500 g. | 500 g. - 1 kg. | > 1 kg. |
| ¿Qué tipo de comida? | Seca | Húmeda | | | |
| ¿Dónde almacenas la comida? | Seca | Húmeda | Mojada | | |
| Perro 2 | | | | | |
| ¿Cuántas veces al día alimentas a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cuántas veces das de beber a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cada cuántas horas? | Each 4 h. | Each 8 h. | Each 12 h. | Each 24 h. | |
| ¿Qué cantidad de comida? | < 100 g. | 100 - 250 g. | 250 g. - 500 g. | 500 g. - 1 kg. | > 1 kg. |
| ¿Qué tipo de comida? | Seca | Húmeda | | | |
| ¿Dónde almacenas la comida? | Seca | Húmeda | Mojada | | |
| Perro 3 | | | | | |
| ¿Cuántas veces al día alimentas a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cuántas veces das de beber a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cada cuántas horas? | Each 4 h. | Each 8 h. | Each 12 h. | Each 24 h. | |
| ¿Qué cantidad de comida? | < 100 g. | 100 - 250 g. | 250 g. - 500 g. | 500 g. - 1 kg. | > 1 kg. |
| ¿Qué tipo de comida? | Seca | Húmeda | | | |
| ¿Dónde almacenas la comida? | Seca | Húmeda | Mojada | | |
| Perro 4 | | | | | |
| ¿Cuántas veces al día alimentas a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cuántas veces das de beber a tu perro? | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| ¿Cada cuántas horas? | Each 4 h. | Each 8 h. | Each 12 h. | Each 24 h. | |
| ¿Qué cantidad de comida? | < 100 g. | 100 - 250 g. | 250 g. - 500 g. | 500 g. - 1 kg. | > 1 kg. |
| ¿Qué tipo de comida? | Seca | Húmeda | | | |
| ¿Dónde almacenas la comida? | Seca | Húmeda | Mojada | | |

2. Tienes alguno de estos alimentadores automáticos? Si no, pasa la pregunta 3

| | | | | | | |
|-----|----------------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2.1 | ¿Cuál es la marca? | Andrew James | Trixie | Pisces | Pet Mate | Pintofeed |
| 2.2 | ¿Cuánto te costó? | < 20 € | 20 - 30 € | 30 - 40 € | 40 - 50 € | > 50 € |
| 2.3 | Influencias para comprarlo | | | | | |

3. ¿Por qué no tienes un alimentador automático?

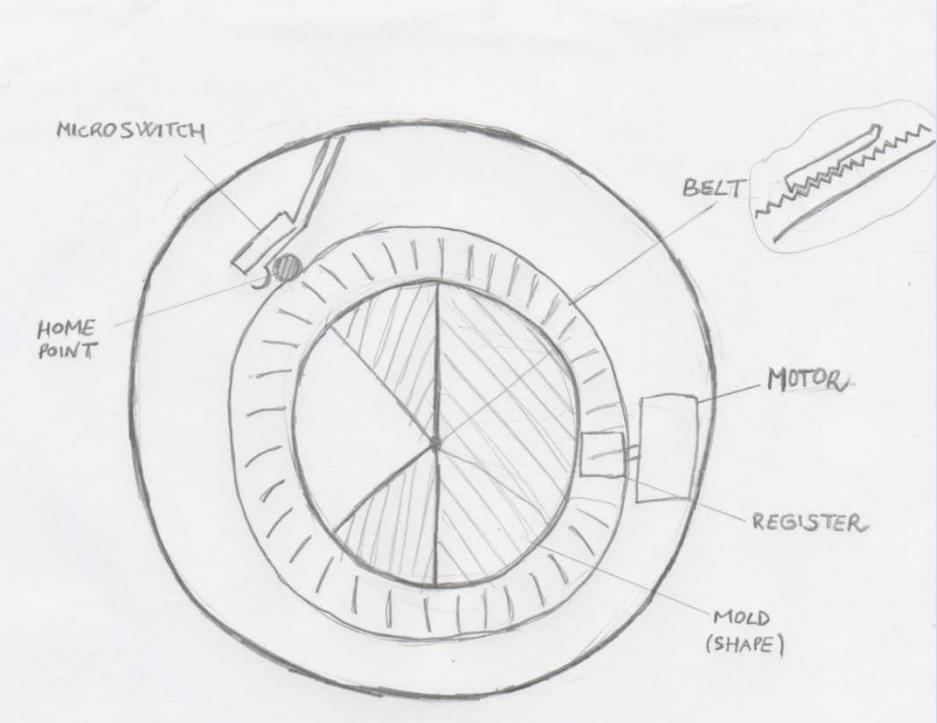
4. Opinión sobre los siguientes sistemas automáticos:

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Pisces 6 Comidas Alimentador Automát. (26.49€) Vendedor: Aquatix-2u Ltd</p> | <p>Descripción: 6 comidas separadas Programable para 6 tiempos diferentes Acepta comida seca y húmeda Con micrófono, altavoz e indicador de batería Con reloj en pantalla LCD Graba un mensaje personal para tu perro Fácil limpieza</p> |
| <p>Comentarios negativos:</p> | <p>Comentarios positivos:</p> |
|  <p>Trixie TX2 2 Alimentador Automático (21.99 €)</p> | <p>Descripción: Para 2 comidas de 330 ml, puede ser programado junto o por separado Temporizador de 48 horas También para comida húmeda Incluye 2 packs de hielo para mantenerla comida Antideslizante Fácil limpieza Funciona a pilas (2 pilas AA)</p> |
| <p>Comentarios negativos:</p> | <p>Comentarios positivos:</p> |
|  <p>Andrew James 90 comidas programables(29.99 €)</p> | <p>Descripción: Alimentación de 1 a 4 veces al día 90 comidas o 45 tazas Alarma programable cuando se acaba la comida Mensaje personal Sensor que evita la sobrecarga de la bandeja Comida programable de ¼ a 2 & a ½ tazas Tolva transparente para ver la cantidad Fácil limpieza</p> |
| <p>Comentarios negativos:</p> | <p>Comentarios positivos:</p> |

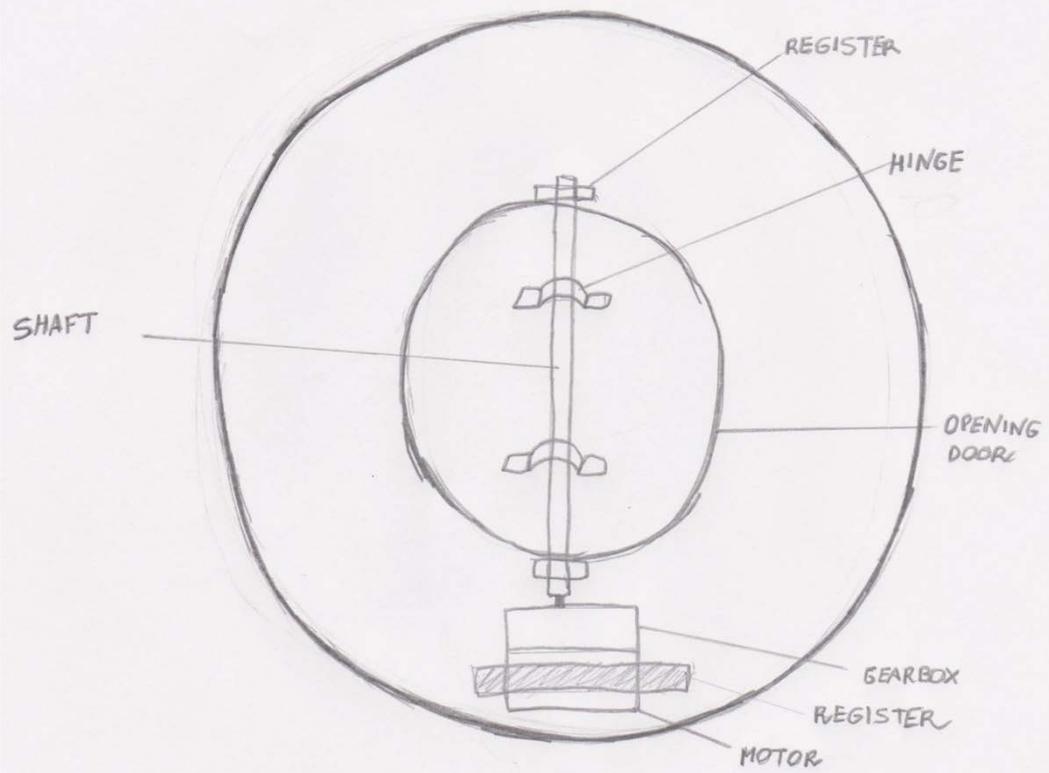
5. ¿Cuánto tiempo puede ser la comida/agua dejada al perro?

6. ¿Cuánto pagarías por uno de estos sistemas?

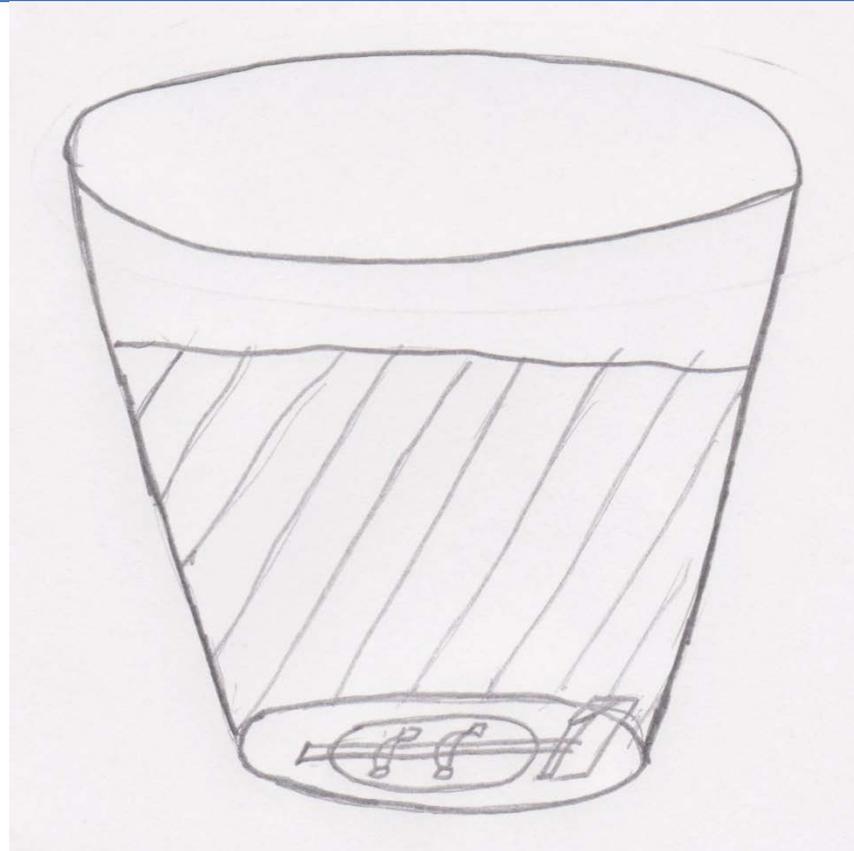
Apéndice G - Bocetos

| Número de Boceto | Imagen |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Boceto 1 (vista en planta) |  |
| Boceto 1 |  |

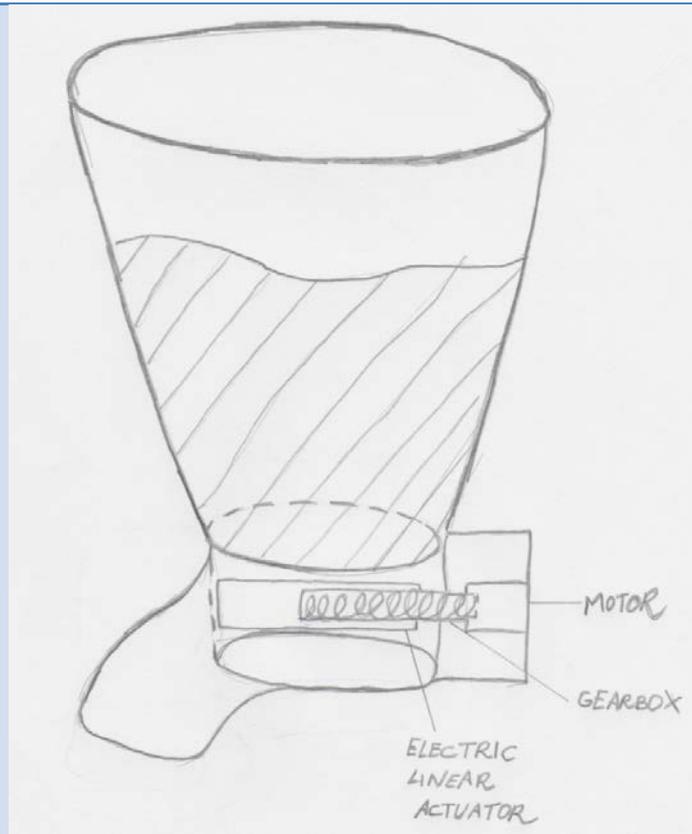
Boceto 2
(Vista en planta)



Boceto 2



Boceto 3



Boceto 4



**Boceto 4
(detalle)**

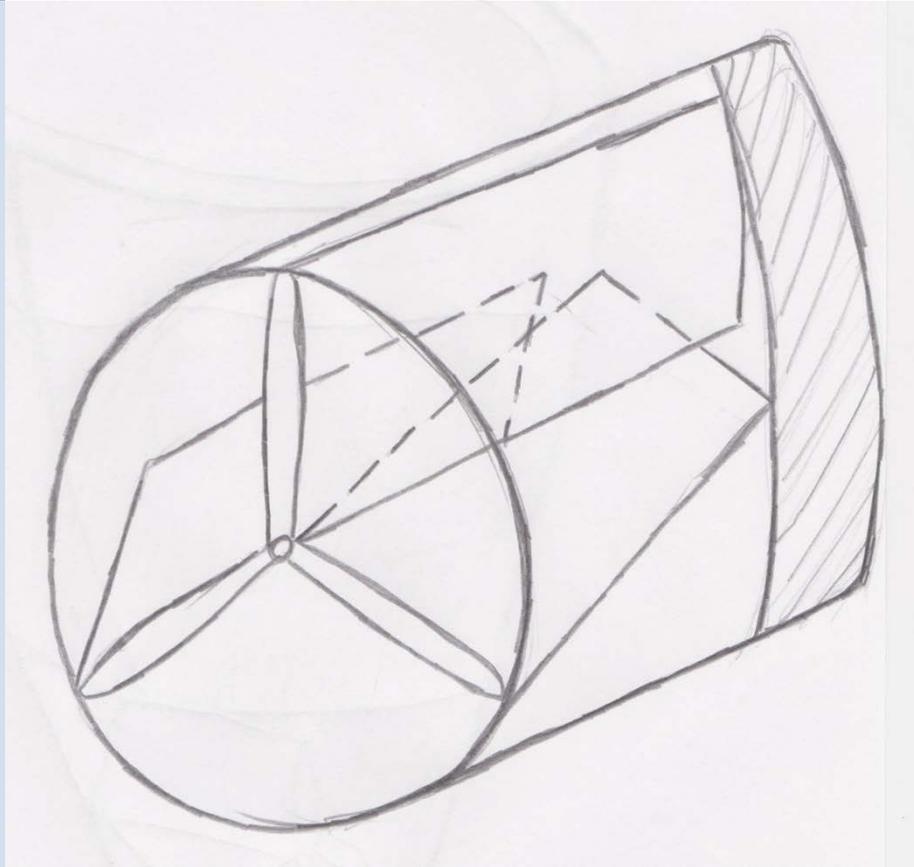


Figura 26- Bocetos

Apéndice H – Soldadura de Arco de Gas Tungsteno

El proceso de soldadura fue Soldadura de Arco de Gas Tungsteno (GTAW – Gas Tungsten Arc Welding), también conocida como Soldadura de Gas Inerte Tungsteno (TIG – Tungsten Inert Gas Welding) que es un proceso de soldadura que usa un electrodo no consumible de tungsteno para producirla. Debido a la alta resistencia a la temperatura del tungsteno además de la protección del gas (normalmente argón o helio) la punta del electrodo se desgasta ligeramente. La principal ventaja de este método de soldadura es que es posible obtener cordones más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que otros procedimientos ya que el gas protector previene el contacto entre el oxígeno de la atmósfera y el fundido. Otras ventajas son la alta calidad del proceso, baja distorsión, control de precisión, no producción de salpicaduras y que la soldadura puede realizarse con o sin metal de aporte. Además no requiere limpieza después del proceso y no hay chispas debido al flujo de metal de aporte a través del arco (Kenyon 1987: 6, Vausse 2002).

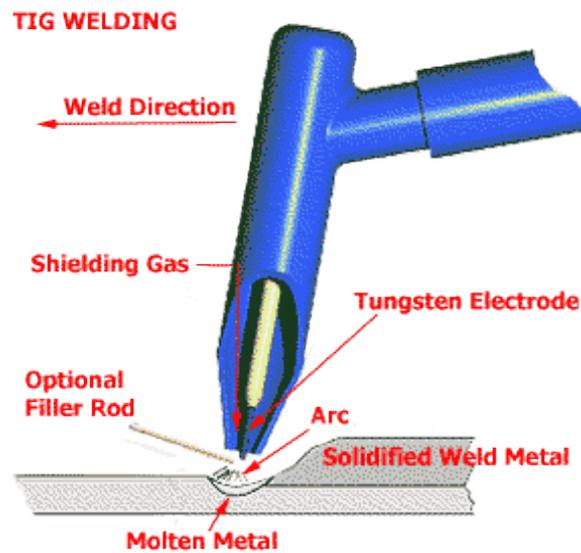


Figura 27- Soldadura TIG

Apéndice I - Características Placa Arduino UNO

| Parámetro | Valor |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Microcontroller | ATmega328 |
| Operating Voltage | 5V |
| Input Voltage (recommended) | 7-12V |
| Input Voltage (limits) | 6-20V |
| Digital I/O Pins | 14 (of which 6 provide PWM output) |
| Analog Input Pins | 6 |
| DC Current per I/O Pin | 40 mA |
| DC Current for 3.3V Pin | 50 mA |
| Flash Memory | 32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader |
| SRAM | 2 KB (ATmega328) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega328) |
| Clock Speed | 16 MHz |

Tabla 5- Características Arduino UNO

Apéndice J – Arduino Motor Shield characteristics

| Parameter | Value |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| Operating Voltage | 5V to 12V |
| Motor controller | L298P, Drives 2 DC motors or 1 stepper motor |
| Max current | 2A per channel or 4A max (with external power supply) |
| Current sensing | 1.65V/A |

Tabla 6- Características Arduino Motor Shield

Apéndice K – Arduino code (Sarafan, R.)

```
void setup() {  
  
    //Configuración Canal A  
  
    pinMode(12, OUTPUT); //Inicia pin del Motor de Canal A  
  
    pinMode(9, OUTPUT); //Inicia pin de Freno de Canal A  
  
}  
  
void loop()  
  
{  
  
    //Avance @ mínima velocidad  
  
    digitalWrite(12, HIGH); //Establece dirección de avance del Canal A  
  
    digitalWrite(9, LOW); //Desacopla el freno del Canal A  
  
    // Mínima velocidad 80  
  
    analogWrite(3, 256); //Gira el motor en Canal A a plena velocidad  
  
    delay(3000);  
  
    digitalWrite(9, HIGH); //Acopla el freno del Canal A  
  
    delay(5000);  
  
    //Hacia atrás @ mitad de velocidad
```

```
digitalWrite(12, LOW); //Establece sentido hacia atrás del Canal A
```

```
digitalWrite(9, LOW); //Desacopla el freno del Canal A
```

```
analogWrite(3, 80); //Gira el motor en Canal A a mitad de velocidad
```

```
delay(3000);
```

```
digitalWrite(9, HIGH); //Acopla el freno del Canal A
```

```
delay(5000);
```

```
}
```

Appendix L - Arduino code

```
int iMicroPin=5;
```

```
int oMotorPWM = 3;
```

```
int oMotorDireccion = 12;
```

```
int oMotorFreno = 9;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    pinMode(iMicroPin, INPUT_PULLUP); // Para activar la resistencia pull-up interna
```

```
    pinMode(oMotorPWM, OUTPUT);
```

```
    pinMode(oMotorDireccion, OUTPUT); // Sentido de avance
```

```
    pinMode(oMotorFreno, OUTPUT); // Arranque y freno
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
```

```
    digitalWrite(oMotorDireccion, LOW); // Sentido de avance
```

```
    digitalWrite(oMotorFreno, LOW); // Arrancar
```

```
analogWrite(oMotorPWM, 200); // Arrancamos el motor
```

```
delay(1000); // Tiempo para que se libere el micro
```

```
while (digitalRead(iMicroPin) == HIGH) // Mientras micro no está en posición
```

Descarga

```
{
```

```
    delay(50);
```

```
}
```

```
digitalWrite(oMotorFreno, HIGH); // Frenar
```

```
analogWrite(oMotorPWM, 0); // Paramos el motor
```

```
delay (3000); // Tiempo de descarga
```

```
digitalWrite(mMotorFreno, LOW); // Arrancar
```

```
analogWrite(oMotorPWM, 200); // Arrancamos el motor tras descarga
```

```
delay(1000); // Tiempo para que se libere el micro
```

```
while (digitalRead(iMicroPin) == HIGH) // Mientras micro no está en posición
```

HOME

```
{
```

```
    delay(50);
```

```
}
```

```
digitalWrite(oMotorFreno, HIGH); // Frenar
```

```
analogWrite(oMotorPin, 0); // Paramos el motor
```

```
delay (3000); // Tiempo entre descargas
```

```
}
```

Appendix M – Hoja de características del microrruptor

Low Cost Standard Microswitch with Lever

- Low-cost standard microswitch• Internationally accepted standard size and operating characteristics

The switch is manufactured from glass-reinforced thermoplastic to give rugged performance. The switches is a single-pole double-throw. Terminals are 6.35mm (¼in.) blade type that can either be soldered or used with push-on connectors (e.g., HF10L). The actuator is a stainless steel 27.5mm long lever.

| | |
|------------------------|----------------------|
| Specifications: | |
| Contact rating: | 6A - AC 250V |
| Body size: | 27.8 x 15.9 x 10.3mm |
| Fixing centres: | 22.2 x 10.3mm |

Tabla 7- Características del microrruptor

Apéndice N – Resultados comparativa

| | Positivo | Negativo |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1^{er} diseño</p>  | <p>Varios días (cantidad grande)</p> <p>Diferentes tipos de comida</p> <p>Bueno para perros pequeños</p> <p>Práctico</p> <p>Económico</p> <p>Fácil limpieza</p> <p>El mejor (completo)</p> | <p>Espacio</p> |
| <p>2^o diseño</p>  | <p>Comida y agua</p> <p>Práctico</p> <p>Fácil limpieza</p> <p>Antideslizante</p> <p>Comida seca y húmeda</p> | <p>Abierto todo junto (imposible separar comidas) – Demasiada cantidad</p> <p>Fácil rotura</p> <p>Caro comparado con el 1^o</p> |
| <p>3^{er} diseño</p>  | <p>Mucha cantidad</p> <p>Sensor</p> <p>Bueno para regular la cantidad</p> | <p>Diseño</p> <p>Los perros pueden ver la comida</p> <p>Demasiado grande</p> |

Tabla 8- Comparación entre sistema comerciales

Friction Effect Analysis of a DC Motor

Ivan Virgala*, Peter Frankovský, Mária Kenderová

Department of applied mechanics and mechatronics, Technical university of Košice / Faculty of mechanical engineering, Košice, Slovakia

*Corresponding author: ivan.virgala@tuke.sk

Received December 21, 2012; Revised January 13, 2013; Accepted February 26, 2013

Abstract Precision positioning systems are fundamental components in industrial machines such as machine tools, measuring machines and semiconductor manufacturing systems. The performance of the machines depends on the positioning systems. For precise positioning are often used DC motors. The paper deals with experimental method of DC motor friction identification. The aim of the paper is determining of suitable way of DC motor friction modeling. At first the basic static friction models are introduced and linear mathematical model of DC motor is established. DC motor friction identification is by means of experimental method done using Newton's mechanics. For experiment PITTMAN 9413 motor with encoder is used. For measuring of friction torque the measuring I/O card is used which cooperates with Matlab / Simulink by Real Time Toolbox. Then the mathematical model is simulated and compared with real model of DC motor. In the conclusion the effects of particular friction models affecting DC motor are described and the best way of friction modeling for DC motor is determined.

Keywords: DC motor, friction, identification, Simulink, Stribeck

1. Introduction

Nowadays there are a lot of tasks in mechatronics which concern precise positioning in mechanisms. Mostly a friction phenomenon plays large problem in these tasks and many times it has to be compensated. The friction can be compensated by various ways, for example by design solution, by lubricant or by suitable friction compensation method. The friction is a phenomenon which is not easily to describe exactly. For these purposes there were a lot of friction models and compensating schemes described.

Modeling and identification of mechanical systems constitute an essential stage in practical control design and applications. Controllers commanding systems that operate at varying conditions or require high precision operation raise the need for a non-linear approach in modeling and identification. Most mechanical systems used in industry are composed of masses moving under the action of position and velocity dependent forces. These forces exhibit nonlinear behavior in certain regions of operation [1].

DC motors, as components of electromechanical systems, are widely used as actuating elements in industrial applications for their advantages of easy speed and position control and wide adjustability range. Consequently, examination of DC motor behavior constitutes a useful effort for analysis and control of many practical applications. In modeling a DC motor connected to a load via a shaft, the general approach is to neglect the nonlinear effects and build a linear transfer function representation for the input-output relationship of the DC motor and the load it drives [2,3,11].

In this study a friction of DC motor is investigated. A mathematical model of a DC motor is well known and if

we know to describe a friction in motor we can easily control angular velocity or angular position.

2. Static Friction Models

Friction is the tangential reaction force between two surfaces which are in the contact. In dry sliding contacts between flat surfaces friction can be modeled as elastic and plastic deformation forces of microscopical asperities in contacts. In dry rolling contact, friction is the result of a non-symmetric pressure distribution in the contact. Other physical mechanisms appear when lubricant is added to the contact. For low velocities, the lubricant acts as a surface film, where the shear strength determines the friction. At higher velocities at low pressures a fluid layer of lubricant is built up in the surface due to hydrodynamic effects [13,14].

The behavior of friction has been extensively examined during the 20th century. The experiments have been performed under idealized conditions with clean surfaces and for stationary conditions, e.g. constant velocity.

2.1 Static Friction

Static friction is the friction when the two surfaces are sticking. The force required to overcome the static friction and initiate motion is called the breakaway force. The static friction is usually larger than Coulomb friction force.

2.2 Coulomb Friction

Coulomb friction is independent of velocity and is always present. This friction component is only dependent on the direction of motion, in such way that it is in the direction opposite to the velocity. The magnitude of

Coulomb friction depends on the properties of the surfaces in contact and the normal force. Coulomb friction is also known as kinetic friction [12].

2.3 Viscous Friction

Viscous friction is dependent of the velocity. At zero velocity the viscous friction is zero and the viscous component increases with the increase of velocity.

2.4 Stribeck Friction

Stribeck friction arises from the usage of fluid lubrication. At low velocity the friction will decrease with the increase velocity. Stribeck friction is usually expressed by following equation [15]:

$$F_f(v) = F_C + (F_S - F_C)e^{-\frac{|v|}{v_S}} + F_V v \quad (1)$$

where F_C , F_S , v_S , $F_V v$ are Coulomb friction, static friction, stribeck velocity and viscous friction, respectively. The Stribeck friction is in the Figure 1 shown.

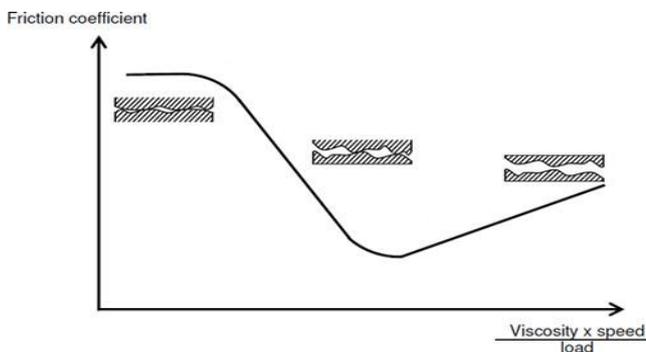


Figure 1. Stribeck friction

3. DC Motor Mathematical Model

A DC motor consists of two sub-processes: electrical and mechanical. The electrical sub-process consists of armature inductance, armature resistance and the magnetic flux of the stator. A second sub-process in the motor is a mechanical one. It consists of the inertia of the motor and a load. The difference in motor speed is caused by the electromagnetic moment generated by the amplifier current, load and friction of the motor [4].

The main advantages of the DC motors are easy speed or position control and wide adjustable range to follow a predetermined speed or position trajectory under load. These have been extensively used in several industrial applications [5,6,7,8,9,10].

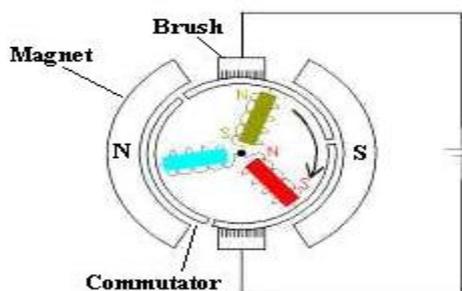


Figure 2. Permanent magnet DC motor

One of the common used actuator in control systems is a DC motor. The Figure 3 shows simplified electrical circuit of DC motor and mechanical model of a rotor.

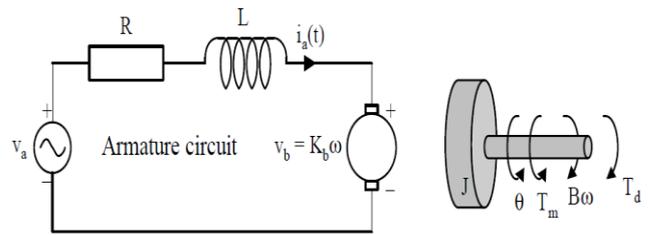


Figure 3. DC motor

For the armature of DC motor we will use (PITTMAN 9413) the following parameters values are:

- R=armature resistance= 5.35 Ω
- L=armature inductance=3.93 mH
- J=moment of inertia=2.75e⁻⁶ kgm²
- K_t=motor torque constant=0.0316 Nm/A
- K_e=back emf constant=0.0316 Vrad/s
- B=viscous friction (will be identified by experiment)
- T_m=motor torque

The mathematical model of DC motor is expressed by following equations:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = T_m(t) \quad (2)$$

$$L \frac{di_a(t)}{dt} + Ri_a(t) = v_a(t) - v_b(t) \quad (3)$$

$$v_b = K_e \omega(t) \quad (4)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (5)$$

By means of Laplace transformation we can obtain transfer function of DC motor.

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t K_e}{(Js + B)(Ls + R) + K_t K_e} \quad (6)$$

The mathematical model can be expressed by block diagram according the Figure 4.

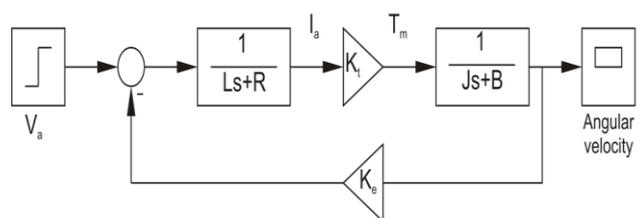


Figure 4. Block diagram of DC motor

Accurate model building is a crucial stage in practical control problems. An adequately developed system model is essential for reliability of the designed control. When the plant has uncertainties or time dependencies, or cannot be parameterized, a model for the system may be hard to obtain. For such systems, the system parameters should be determined using system identification techniques [3].

If all the variables of motor are know the experiment for friction identification can be done.

4. Experiments and Simulations

Consider the DC motor motion equation in general.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_m(t) - T_f \tag{7}$$

where T_f is motor friction in general. When angular velocity has constant value, the left side of equation equals zero and motor torque equals to friction torque.

$$T_m(t) = T_f \tag{8}$$

Now the motor friction measuring task changes to the motor torque measuring, of course for constant angular velocity. Using DC motor without any load with voltage supply we reach angular velocity, what is by motor encoder measured.

4.1 Experiment

The experiment is by means of input-output measuring card MF624 done. MF624 has a several digital inputs/outputs, analog inputs/outputs and encoders. Limitation of inputs and outputs signals is +10 V. The measuring card cooperate with software Matlab / Simulink through Real Time Toolbox.

The wiring scheme is in the Figure 5 shown.

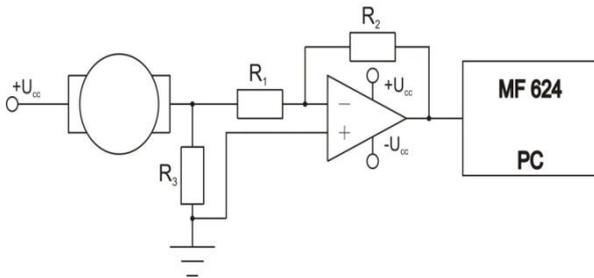


Figure 5. Wiring scheme

The measuring card can work only with voltage signal therefore we have to measure voltage change on the resistor R_3 . According to Ohm's law can be actual current expressed and by measuring of actual current we can express actual motor torque which equals to the friction torque. Photo from experiment in the Figure 6 is shown.

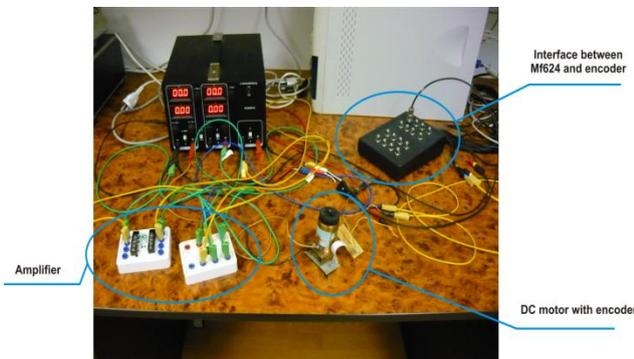


Figure 6. Experiment

At first the static friction of dc motor is determined. The motor voltage supply increases to the moment when the motor shaft starts rotate. The maximum value of motor torque for stationary motor shaft presents static friction torque. For static friction of motor were done ten

measurements. The example of measurement in the Figure 7 is shown.

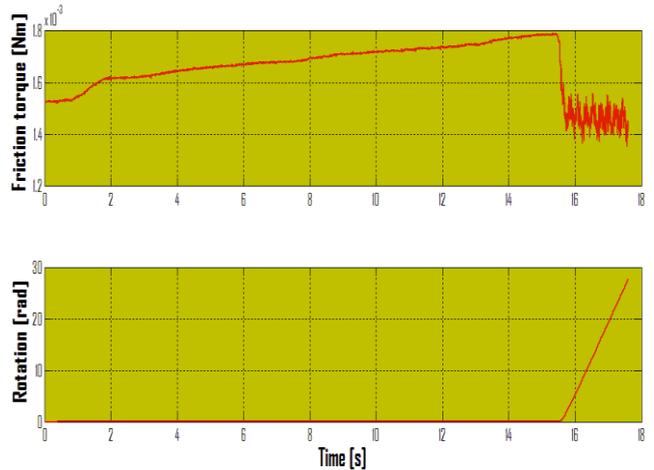


Figure 7. Measurement of the DC motor static friction

As can be in the Figure 7 seen, the motor friction decreases when the shaft starts rotate what indicates Stribeck effect.

On the next figure is shown measured DC motor torque for constant angular velocity.

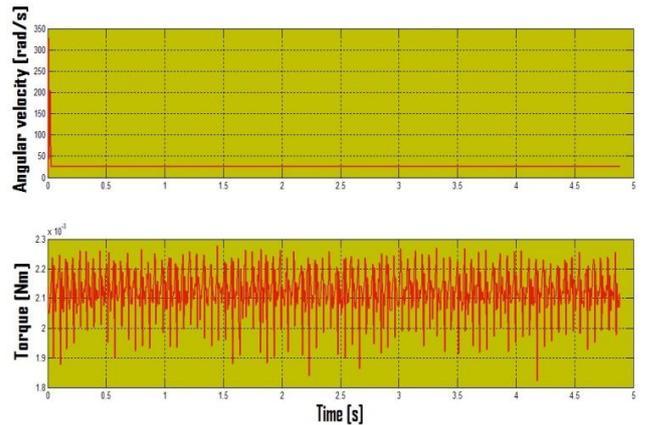


Figure 8. DC motor torque for constant angular velocity

For constant velocity is determined DC motor torque by computation of torque average value.

Next measurement is for motor in motion. Motor supply voltage gradually increases with step 0.3 V up to the value 19 V. The results of measurements in the figure 9 are shown.

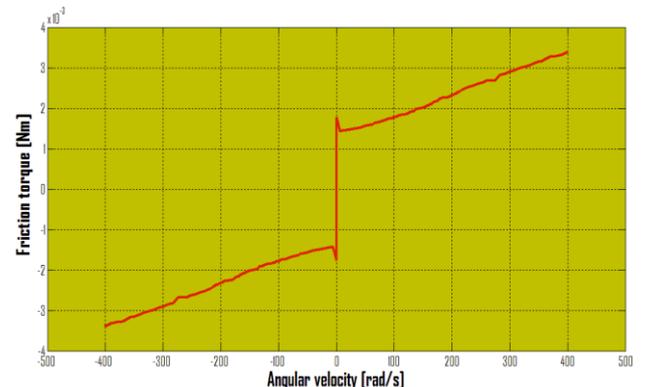


Figure 9. Friction characteristics of DC motor

In the Figure 9 can be seen Stribeck friction. From the static friction the friction decreases up to Stribeck velocity and then mainly the viscous friction occurs.

Now the mathematical model can be verified with measured values.

4.2 Simulation and Comparison with Experiment

This section discusses with ways of friction modeling. At first sight the friction characteristics appear like linear increasing with significantly slope. So, at first we can model friction like viscous friction. Neglecting the static friction we get linear equation:

$$y(x) = 0.0000049804x \tag{9}$$

Assuming that DC motor stall torque is 0.1102 Nm (from datasheet) the slope of viscous part of friction is very small. The curve with very small slope should be replaced by straight line which presents Coulomb friction model with value 0.0025 Nm, see Figure 10.

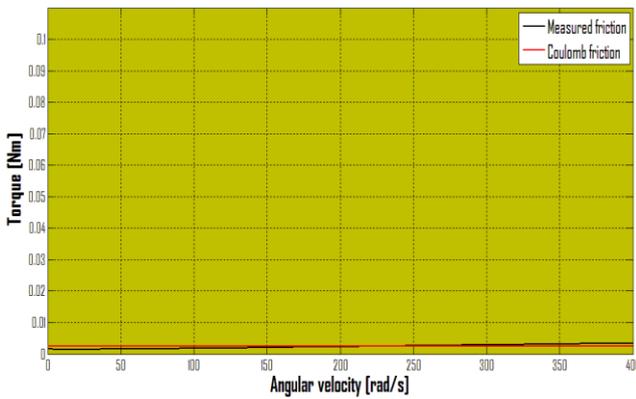


Figure 10. Coulomb friction in comparison with measured friction

In the Figure 11 the all three frictions are shown.

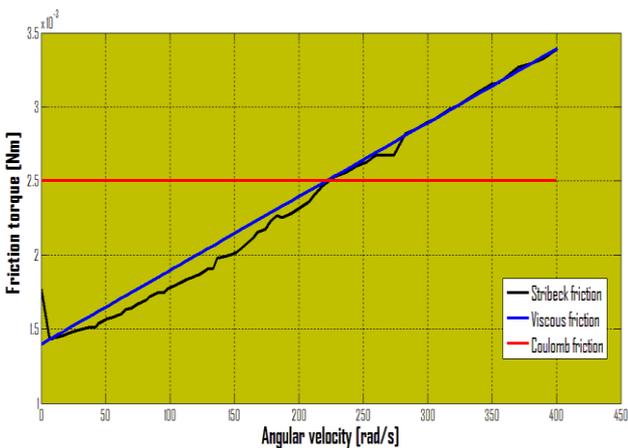


Figure 11. Stribeck, viscous and Coulomb friction

After DC motor friction identification can be verification done in software Matlab / Simulink. Verification is based on mathematical model with assuming three different friction courses. The first is model with Stribeck friction, second is model with viscous friction and third is model with Coulomb friction. The models are compared with experiment where as input variable is DC motor voltage supply (in the simulation

represented by step block) and as output variable is angular velocity. The results in the figures 12-14 are shown.

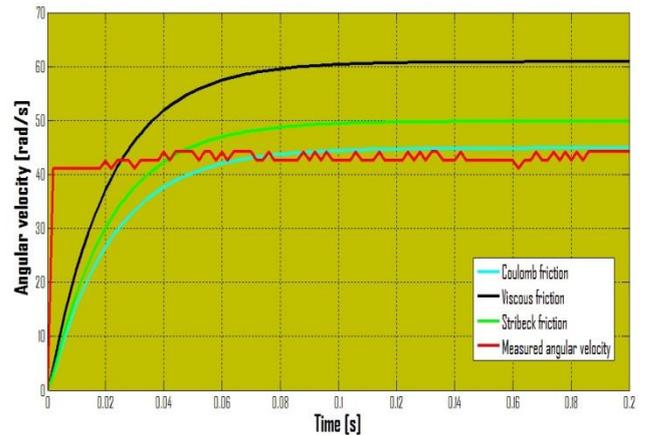


Figure 12. DC motor angular velocity with different friction models – voltage supply – 2 V

Closest to the measured angular velocity is model with Coulomb friction. The next is Stribeck friction. Interestingly, that viscous friction which is very similar to Stribeck friction, see Figure 11, gives less precise result in comparison with Coulomb friction.

On the next figure the same measurement is done with the voltage supply 4 V.

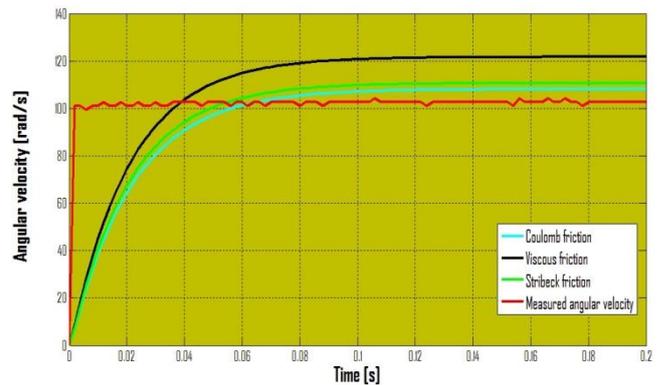


Figure 13. DC motor angular velocity with different friction models – voltage supply – 4 V

Now for voltage supply - 4 V, the model with Coulomb friction is not so close to the measured angular velocity as in the case with 2 V.

In the next figure the voltage supply is 6 V.

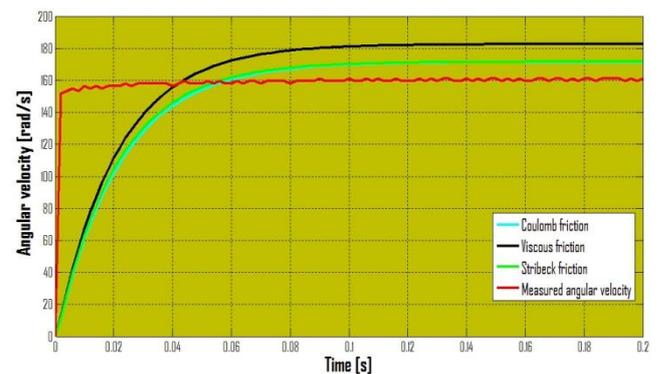


Figure 14. DC motor angular velocity with different friction models - voltage supply - 6 V

From the Figure 14 is obvious that Coulomb friction is almost same as Stribeck friction. From the last three simulations it can be seen that the higher voltage supply is the bigger distance appears between measured angular velocity and angular velocity of model with assuming Coulomb friction. From this reason it is not suitable solution to use Coulomb friction model to modeling DC motor mathematical model.

Nevertheless, that viscous friction model gives better mathematical model because of its linearity, for more precisely results it should be used Stribeck friction model, which is very close to measured angular velocity.

5. Conclusion

The problem of accurate control of electromechanical systems is very important in many industrial applications such devices, e.g. motors or essential parts of positioning / tracking systems. A friction, occurring in moving mechanisms, causes failures especially during precise position regulation. Friction was described by several friction models in the past. In the paper the DC motor (PITTMAN 9413) friction is identified by experimental method using measuring card MF624 which cooperate with Matlab / Simulink. The result shows that Coulomb friction model gives better result in comparison with viscous friction model but the best result gives mathematical model of DC motor with considering Stribeck friction. Coulomb and Stribeck friction model causes non-linearities in model in comparison with viscous friction model but gives more precisely result. For tasks, where DC motor is used for precise positioning should be used more complicated model of friction like Stribeck friction.

Acknowledgement

The authors would like to thank to Slovak Grant Agency – project VEGA 1/1205/12 “Numerical modeling of mechatronic systems”. This contribution is also result of the project APVV-0091-11 “Using of methods of experimental and numerical modeling for increasing of competitiveness and innovation of mechanical and

mechatronic systems.” This contribution is also the result of the grant project of Tatra Banka - “LocoSnake - robotic mechanisms motion with steering software support”.

References

- [1] T. Kara, I. Eker, “Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments”, Energy and Management, Elsevier, 2003.
- [2] J. Hornig, “Neural adaptive tracking control of a DC motor”, Informat Sci, 1999.
- [3] T. Söderström, T. Stoica, “System identification”. Cambridge, UK: Prentice Hall, 1989.
- [4] T. Tjahjowidodo, F. Al-Bender, H. Van Brussel, “Friction identification and compensation in a DC motor”, Mechanical Engineering Department, Heverlee, Belgium.
- [5] S. E. Lyshevski, Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors. *Mechatronics*, Vol. 9, pp 539-552, 1999.
- [6] J. O. Jang and G. J. Jeon, A parallel neuro-controller for DC motors containing nonlinear friction, *Neurocomputing*, Vol. 30, pp 233-248, 2000.
- [7] J. H. Hornig, Neural adaptive tracking control of a DC motor, *Information Sciences*, Vol.118, pp 1-13, 1999.
- [8] M. J. Chung and D. G. Gweon, Modelling of the armature slotting effect in the magnetic field distribution of a linear permanent magnet motors, *Electrical Eng*, Vol. 84, pp 101-108, 2002.
- [9] K. Ziaei and N. Sepehri, Modelling and identification of electrohydraulic servos. *Mechatronics*, Vol. 10, pp 761-772, 2000.
- [10] Y. Yavin and P. D. Kemp, Modelling and control of the motion of a rolling disk: effect of the motor dynamics on the dynamical model, *Comput. Methods in Appl Mec and Eng*, Vol.188, pp 613-624, 2000.
- [11] M. Štamborská “Determination of stress fields from measured relative deformation fields using digital image correlation”, I. Workshop of young researchers, VŠB – TUO, ISBN 978-80-248-2885-5, 2012.
- [12] H. Olsson, K. J. Åström, C. Canudas de Wit, M. Gäfvert, and P. Lischinsky, “Friction models and friction compensation”, *European journal of control*, No. 4, pp. 176-195, December 1998.
- [13] C. Iurian, F. Ikhouane, J. Rodellar, R. Grinó, “Identification of a system with dry friction”, University of Barcelona, September 2005.
- [14] B. Armstrong, “Stick slip and control in low-speed motion”, *IEEE transaction on automatic control*, vol. 38, No. 10, 1993.
- [15] R. Hensen, “Controlled mechanical systems with friction”, Technische Universiteit Eindhoven, ISBN 90-386-2693-2, 2002.