

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Diseño y desarrollo de un sistema robótico de
captura de piezas ferromagnéticas para multirrotores

Autor: Manuel Villar Ruiz

Tutor: Ángel Rodríguez Castaño

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño y desarrollo de un sistema robótico de captura de piezas ferromagnéticas para multirrotores

Autor:

Manuel Villar Ruiz

Tutor:

Ángel Rodríguez Castaño

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Diseño y desarrollo de un sistema robótico de captura de piezas ferromagnéticas para multirrotores

Autor: Manuel Villar Ruiz

Tutor: Ángel Rodríguez Castaño

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi familia y amigos por su inestimable ayuda y numerosos consejos, a Fátima por su apoyo y, sobre todo, a mis padres.

También a mis profesores y, en especial, a Ángel Rodríguez Castaño.

Resumen

El fin de este proyecto es diseñar un sistema de cogida o agarre de los bloques ferromagnéticos pertenecientes al “Challenge 2” del concurso internacional de robótica MBZIRC 2020 (Mohamed Bin Zayed Intenational Robotics Challenge) que tendrá lugar en Abu Dabi.

También están incluidos en el proyecto el diseño, fabricación y validación de los diferentes diseños.

A través del programa Solid Edge ST9 se han diseñado la mayoría de los elementos físicos. Muchos de estos elementos han sido creados mediante impresión 3D con las impresoras Ultimaker 2+ y BCN 3D sigmax. Para la fase final de justificación de diseños se han usado análisis basados en el método de los elementos finitos aplicados al magnetismo.

| | |
|---|-------------|
| Agradecimientos | viii |
| Resumen | ix |
| Índice | xi |
| Índice de Tablas | xiii |
| Índice de figuras | xiv |
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| 1.1. <i>Nociones sobre magnetismo</i> | 2 |
| 1.1.1. Campo magnético | 2 |
| 1.1.2. Corrientes de Foucault | 4 |
| 1.1.3. Materiales ferromagnéticos | 4 |
| 1.1.4. Curva de imanación y características de los materiales magnéticos | 5 |
| 1.1.5. Imán electropermanente | 7 |
| 1.2. <i>Antecedentes</i> | 8 |
| 1.2.1. Descripción del “Challenge 3” del MBZIRC 2017 | 8 |
| 1.2.2. Equipamiento y pesos | 8 |
| 1.2.3. Mecanismo de cogida | 10 |
| 1.3. <i>Metodología</i> | 12 |
| Capítulo 2. Descripción del reto para la edición 2020 | 14 |
| 2.1. <i>Challenge 2 MBZIRC 2020</i> | 14 |
| 2.2. <i>Modelos de los bloques creados para pruebas.</i> | 15 |
| 2.3. <i>Requisitos</i> | 15 |
| 2.3.1. Fuerza de sujeción | 15 |
| 2.3.2. Resistencia al deslizamiento | 15 |
| 2.3.3. Sensores | 16 |
| 2.3.4. Control del dispositivo | 16 |
| 2.3.5. Peso y tamaño | 16 |
| Capítulo 3. Implicaciones físicas y pérdidas de rendimiento | 17 |
| 3.1. <i>Desempeño de la fuerza de sujeción</i> | 17 |
| 3.1.1. En el despegue | 17 |
| 3.1.2. Durante el transporte | 18 |
| Fuerza de sujeción | 19 |
| Resistencia al deslizamiento | 19 |
| Lugar de sujeción | 20 |
| Conclusión | 21 |
| 3.1.3. En el momento de la colocación | 21 |
| 3.2. <i>Materiales</i> | 21 |
| 3.3. <i>Efecto de la distancia de un imán al material ferromagnético y del espesor del mismo sobre la fuerza ejercida por el imán</i> | 22 |
| 3.3.1. Efecto del espesor | 24 |
| 3.3.2. Efecto de la distancia | 25 |
| 3.4. <i>Conductividad de la capa superficial</i> | 25 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 3.5. | <i>Conductividad y aislamiento del campo magnético</i> | 25 |
| 3.6. | <i>Errores de control</i> | 26 |
| 3.7. | <i>Errores dimensionales</i> | 26 |
| 3.8. | <i>Margen de seguridad para compensar pérdidas de rendimiento</i> | 26 |
| Capítulo 4. | Diseños. | 27 |
| 4.1. | <i>Primer diseño</i> | 27 |
| | Conclusiones | 28 |
| 4.2. | <i>Segundo diseño</i> | 28 |
| | Conclusiones | 29 |
| 4.3. | <i>Tercer diseño</i> | 30 |
| | Conclusiones | 32 |
| 4.4. | <i>Cuarto diseño</i> | 32 |
| | Conclusiones | 34 |
| 4.5. | <i>Quinto diseño</i> | 35 |
| | Justificación y conclusiones | 37 |
| 4.6. | <i>Dispositivo final</i> | 42 |
| Capítulo 5. | Conclusiones finales | 44 |
| | <i>Conclusiones</i> | 44 |
| | <i>Líneas de mejora</i> | 44 |
| | Referencias | 45 |
| | Anexo A: Datos | 46 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1–1 Distribución de pesos en UAV edición 2017 | 10 |
| Tabla 2. Características de los objetos del MBZIRC 2020. | 14 |
| Tabla 3. Permeabilidad magnética relativa de materiales ferromagnéticos comunes | 21 |
| Tabla 4. Comparativa de los valores máximos de F ante diferentes espesores. | 24 |
| Tabla 5. Fuerza y distancia para una placa de 0,3 mm de espesor | 25 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - 1. Imán y líneas de campo. | 2 |
| Figura 1 - 2. Líneas de campo de hilo y espira. | 3 |
| Figura 1 - 3. Líneas de campo en forma de madeja. | 3 |
| Figura 1 - 4. Bobina toroidal alrededor de anillo ferromagnético. | 5 |
| Figura 1 - 5. Curva simplificada de histéresis. | 6 |
| Figura 1 - 6. Esquema funcional de imán electropermanente y del cierre magnético. | 7 |
| Figura 1 - 7. UAV aproximándose a disco móvil. | 8 |
| Figura 1 - 8. UAV o plataforma usada para la edición 2017. | 9 |
| Figura 1 - 9. Vista superior e inferior del OpenGrab EMP V3 R5C. | 11 |
| Figura 1 - 10. Dispositivo de cogida de los objetos. | 11 |
| Figura 1 - 11. Dispositivo creado en el sitio de la competición. | 12 |
| | |
| Figura 2 - 1. Recreación virtual del “Challege 2” de la edición 2020 | 14 |
| Figura 2 - 2. UGV equipado con brazo robótico. | 15 |
| Figura 2 - 3. Modelos de los bloques. | 15 |
| | |
| Figura 3 - 1. Aceleraciones sufridas por el bloque durante el despegue. | 17 |
| Figura 3 - 2. Diagrama de fuerzas durante el vuelo. | 18 |
| Figura 3 - 3. Diagrama de fuerzas y distancias ortogonales al eje de giro. | 20 |
| Figura 3 - 4. Fuerza de atracción entre imán y placa de espesor e separada una distancia d . | 22 |
| Figura 3 - 5. Gráfica de fuerza de atracción entre imán de neodimio cilíndrico de 10mm de diámetro por 20mm | 23 |
| Figura 3 - 6. Gráfica de fuerza de atracción entre imán de neodimio en forma de disco de 15mm de diámetro por 3mm de alto y placa. | 24 |
| | |
| Figura 4 - 1. Detalle de la posición de sujeción del primer diseño. | 27 |
| Figura 4 - 2. Detalle de posición de liberación del primer diseño. | 27 |
| Figura 4 - 3. Soporte esférico. | 29 |
| Figura 4 - 4. Vista general del segundo diseño. | 29 |
| Figura 4 - 5. Vista general del tercer diseño. | 30 |
| Figura 4 - 6. Posiciones de agarre y no agarre del tercer diseño. | 31 |
| Figura 4 - 7. Prismas hexagonales centrales del tercer diseño. | 31 |
| Figura 4 - 8. Vista general del cuarto diseño. | 32 |
| Figura 4 - 9. Cuarto diseño fabricado. | 33 |
| Figura 4 - 10. Destornillador dinamométrico. | 33 |
| Figura 4 - 11. Base del cuarto diseño. | 34 |
| Figura 4 - 12. Nuevo enfoque del cierre magnético. | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 4 - 13. Vista general del quinto diseño. | 36 |
| Figura 4 - 14. Vista interior del quinto diseño. | 36 |
| Figura 4 - 15. Vistas explosionadas del quinto diseño. | 37 |
| Figura 4 - 16. Soporte del quinto dispositivo. | 37 |
| Figura 4 - 17. Flujo magnético en la posición de agarre del quinto diseño. | 38 |
| Figura 4 - 18. Detalle de conducción del campo magnético. | 38 |
| Figura 4 - 19. Distribución de fuerzas en la cara de contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de agarre. | 39 |
| Figura 4 - 20. Distribución de fuerzas en la cara opuesta al contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de agarre. | 39 |
| Figura 4 - 21. Flujo magnético del dispositivo en la posición de liberación. | 40 |
| Figura 4 - 22. Detalle del flujo magnético del dispositivo en la posición de liberación. | 40 |
| Figura 4 - 23. Figura 4 - 24. Distribución de fuerzas en la cara de contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de liberación. | 41 |
| Figura 4 - 25. Figura 4 - 19. Distribución de fuerzas en la cara opuesta a la de contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de liberación. | 41 |
| Figura 4 - 26. Detalle de la base del dispositivo final. | 42 |
| Figura 4 - 27. Detalle del interior del dispositivo final. | 42 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Grandes descubrimientos y mejoras implican invariablemente la cooperación de muchas mentes..

- Alexander Graham Bell -

De cara a la participación en el concurso internacional de robótica MBZIRC 2020 ¹, el Departamento de Sistemas y Automática y, en concreto, el Grupo de Investigación para Robótica, Visión y Control (GRVC) estaba empezando a organizarse para afrontar los distintos retos o “Challenges” en los cuales se puede tomar parte.

El propósito de este tipo de concursos es el de evaluar y comparar los métodos y creaciones hechas para afrontar un problema específico y bajo unas condiciones similares. Estos problemas específicos, llamados “challenges”, están diseñados para que uno o un equipo de robots, vehículos aéreos o terrestres no tripulados, los afronte con el objetivo de que lo hagan de la forma más autónoma y eficiente que se pueda.

Los challenges, debido a su complejidad, requieren que se fraccionen en problemas más pequeños que sean solventados por diferentes personas en colaboración y cooperación directa.

El cometido del “Challenge 2” de esta edición es el de localizar, agarrar, transportar y colocar una serie de distintos bloques que tienen material ferromagnético para formar un muro o pared según un determinado patrón. La parte de la problemática a afrontar en este documento es el sistema de cogida o sujeción.

El Grupo de Investigación para Robótica, Visión y Control (GRVC) ya participó en el concurso celebrado en 2017, siendo integrante de uno de los 25 finalistas de un total de 143 participantes. El trabajo realizado y la experiencia en la anterior son tenidos en cuenta para el desarrollo de este proyecto; más adelante se expone resumidamente el trabajo del grupo para aquella ocasión, haciendo especial énfasis en lo relacionado con el sistema de cogida.

Esto supone un punto de partida, en el sentido de que la experiencia obtenida en la pasada edición es tenida en cuenta en los diseños. Dicho esto, el objetivo de este Proyecto de Fin de Grado es el estudio de la problemática a afrontar, el diseño y construcción de los nuevos elementos para superarlos y, por último, la validación y prueba de lo diseñado.

Para la creación de los elementos físicos diseñados se han usado conjuntamente las impresoras 3D: Ultimaker 2+ y BCN3D sigma; ambas son propiedad del grupo y están ubicadas en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

¹ <https://www.mbzirc.com/challenge/2020>

1.1. Nociones sobre magnetismo

Dada la naturaleza ferromagnética de los objetos de la competición hemos considerado el uso de imanes permanentes, electroimanes y electropermanentes. Para justificar los diseños se ha considerado oportuno dedicar este apartado a explicar brevemente algunos conceptos del electromagnetismo, así como propiedades de los materiales ferromagnéticos. Estas explicaciones, por tanto, no entraran en profundidad dado que el estudio del electromagnetismo no es el propósito de este documento.

Para la redacción de este apartado nos hemos valido de varias, las cuales se irán referenciando conforme avance el texto.

1.1.1. Campo magnético

Es bien conocido el concepto de imán (permanente), a pesar de que se pueden encontrar varias definiciones al respecto, como estas encontradas en el diccionario on-line de la Real Academia de Ingeniería:

- Dispositivo que produce un campo magnético externo. [1]
- Trozo de material ferromagnético o ferrimagnético cuyos dipolos están suficientemente alineados par que produzcan un campo magnético neto fuera de él y pueda experimentar un par de torsión neto cuando esté situado en un campo magnético externo. [2]
- Material de acero endurecido u otro material magnético que ha sido fuertemente magnetizado y que conserva indefinidamente su magnetismo después de retirarle el campo magnético que lo imantó. [3]

El campo magnético no es más que la representación matemática del modo en que las fuerzas magnéticas se distribuyen en el espacio que circunda a una fuente magnética. Dicho de otro modo, un campo magnético es un campo de fuerzas que se encuentra siempre rodeando a una fuente de energía magnética, y es en esta región donde interactúan los elementos sensibles al magnetismo, como son los metales ferromagnéticos [4]. Este campo puede ser creado tanto por un imán como por una corriente eléctrica. Su unidad en el sistema internacional es el Tesla (T) aunque en las aplicaciones comunes resulta demasiado grande y se suele usar el Gauss (G).

Los procesos electromagnéticos, en los cuales están incluidos los magnéticos, están regidos por las ecuaciones de Maxwell. No es objetivo de este documento profundizar en ellas, si bien nos valdremos de alguna de ellas para explicar algunos conceptos.

Volviendo a los polos magnéticos, se puede identificar el polo norte como el lugar desde el que parten las líneas de campo externas de un imán, y el polo sur como el lugar al que llegan. Sin embargo, internamente al imán, es al contrario: las líneas de campo van desde el polo sur al norte. La acción del campo magnético puede hacerse notar claramente al acercarlo a un material como el hierro o intentar acercar dos imanes. Es bien conocido el efecto que se producirá en ambos casos: el imán y el hierro se atraerán en todo caso, mientras que si se acercan los polos iguales de dos imanes se notará una fuerza de repulsión; y si se acercan los polos contrarios se notará una fuerza de atracción.

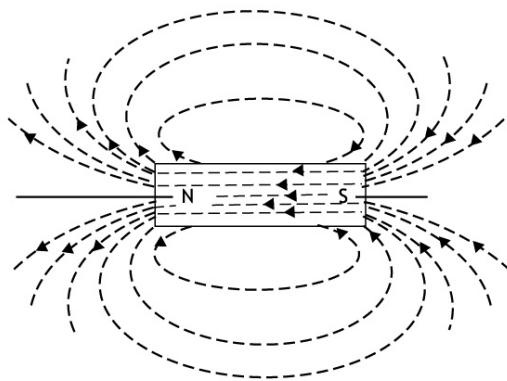


Figura 1 - 1. Imán y líneas de campo.

La imagen anterior ha sido obtenida de la fuente [5].

En la figura anterior puede verse un imán con las líneas de campo o de fuerza del campo magnético que él mismo crea. Para un imán tienen forma cerrada, sin extremos, es decir no tienen principio ni fin, tal y como se deduce de una de las cuatro ecuaciones de Maxwell, la Ley de Gauss para el campo magnético:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \tag{1}$$

Donde \vec{B} es el campo magnético, también llamado inducción magnética, que atraviesa la superficie cerrada \vec{S} . Esta ley universal asegura que el flujo total que atraviesa una superficie cerrada es cero, es decir, entran tantas líneas de campo como salen. De esto se deduce que las líneas del campo magnético no tienen principio ni fin, no tienen un punto donde nacen y otro donde mueren. Por ejemplo para un imán, en el exterior de él puede verse cómo van desde el polo norte (N) del imán hasta el polo sur (S), sin embargo en el interior, las líneas van desde el polo sur al polo norte, cerrando las líneas, tal y como se puede apreciar en la figura anterior. Para otros casos, como por ejemplo, el campo magnético creado por una corriente que circula por un hilo infinito o una espira también son cerradas pero alrededor de éstos (Figura 1 - 2).

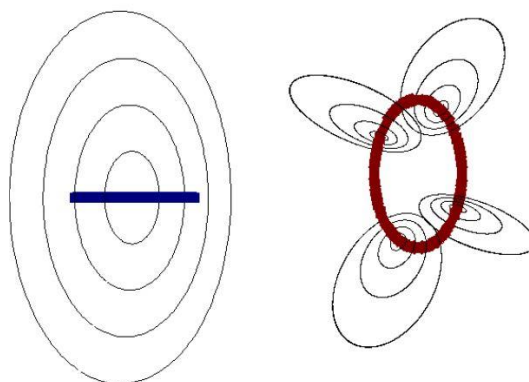


Figura 1 - 2. Líneas de campo de hilo y espira.

Generalmente, en casos de una geometría más compleja como por ejemplo el de una espira alrededor de un hilo, se forman madejas (Figura 1 - 3) muy complicadas que incluso pueden ser caóticas y llenar toda una región del espacio. De hecho, dado que la geometría en la vida real no es perfecta se forman madejas.

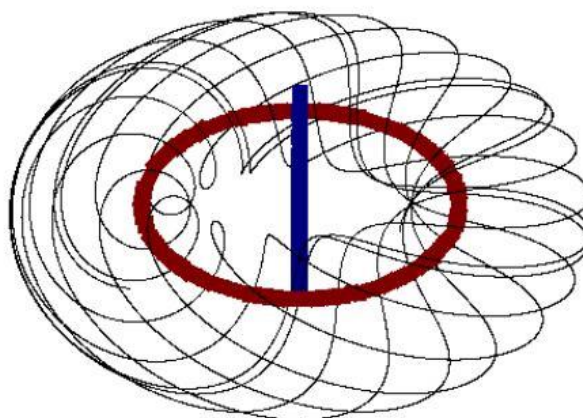


Figura 1 - 3. Líneas de campo en forma de madeja.

Estas figuras han sido obtenidas de la fuente [6].

Volviendo a los imanes, únicamente mirando el campo externo a ellos se hablará de que el campo magnético nace del polo norte y desemboca en el polo sur. Como se ha explicado anteriormente esto no es cierto, sin embargo, usaremos esta terminología para facilitar la explicación de los diseños.

1.1.2. Corrientes de Foucault

Las corrientes de Foucault [7] o corrientes parásitas son un fenómeno eléctrico que se produce cuando un conductor es atravesado por un campo magnético variable. Esta variación causa una circulación de electrones o corriente inducida dentro del conductor que a su vez crea un campo magnético que se opone al efecto del campo magnético aplicado. Este fenómeno está gobernado por la ley de Faraday-Lenz:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2)$$

Donde ε es la fuerza electromotriz o voltaje inducido; Φ_m es el flujo magnético que atraviesa una superficie.

Las consecuencias de esta ley son numerosas, aunque para este proyecto la más interesante es que debido a ella se pueden producir frenos magnéticos. Imaginemos un imán moviéndose a una velocidad constante respecto a una superficie conductora fija sin ningún sistema de propulsión adicional que mantenga esa velocidad, es decir, siguiendo un movimiento rectilíneo uniforme. El movimiento del imán producirá la variación del flujo magnético que atraviesa la superficie. Esta variación, conlleva la creación de un campo magnético que se opone a la variación de flujo y, a su vez, este campo es capaz de producir una fuerza, que acabará por frenar el movimiento del imán. Ocurriría lo análogo si por el contrario se moviera el conductor con respecto al imán.

Estas corrientes tienen una consecuencia adicional, y es el calentamiento del material conductor por efecto Joule. Dependiendo de la aplicación de este fenómeno resultará de interés o será contraproducente.

Este principio físico es el usado para frenar los llamados trenes bala, y aprovechando el calentamiento por efecto Joule, en las vitrocerámicas, donde la variación de flujo es debida a la variación de la corriente que circula por una bobina.

En los transformadores eléctricos inevitablemente se dan corrientes de Foucault. En ellos el calentamiento es un efecto adverso, no deseable, aunque inevitable. Sin embargo, para minimizar las pérdidas producidas por ellas se suelen usar láminas de hierro dulce para crear el núcleo sobre el que están enrolladas las bobinas. Con esta técnica se consigue una buena conducción del campo magnético, debido a la naturaleza del material, y una minimización de las pérdidas por corrientes parásitas.

1.1.3. Materiales ferromagnéticos

Esta sección está basada en la descripción de los materiales ferromagnéticos dada por la fuente [8]

Definición: Permeabilidad magnética y permeabilidad magnética relativa.

Se denomina permeabilidad magnética absoluta (μ) a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos.

Para comparar la capacidad de distintos materiales de conducir o soportar el campo magnético, se entiende la permeabilidad magnética absoluta como el producto entre la permeabilidad magnética relativa (μ_r) y la permeabilidad magnética del vacío (μ_0).

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (3)$$

De lo que se puede deducir que a mayor permeabilidad magnética relativa, mayor capacidad para conducir el campo magnético.

Definición: Circuito magnético.

Para muchas aplicaciones prácticas es posible reducir el problema tridimensional del campo magnético a un problema unidimensional mediante una aproximación satisfactoria. Esta reducción lleva consigo una simplificación enorme por la cual un campo tridimensional se transforma en un circuito unidimensional, o circuito magnético. Este concepto se basa en la idea de que un flujo constante o levemente variable tiende a confinarse en los caminos de permeabilidad elevada, de manera parecida a como lo hacen las corrientes eléctricas en las trayectorias de gran conductibilidad.

Generalmente un circuito magnético consiste en su mayor parte en un material de gran permeabilidad en el cual queda confinado, principalmente, el flujo magnético.

Sin embargo, hay un aspecto que hace que el circuito magnético difiera marcadamente de su análogo eléctrico. Los conductores eléctricos se hayan separados de otros conductores por elementos aislantes que pueden tener fácilmente una conductividad 10^{20} veces menor que la del cobre. Sin embargo, para el magnético el material más diamagnético (con menor permeabilidad relativa) es el bismuto que tiene una permeabilidad del 99,8% la del aire, por lo que en la práctica se utiliza el aire como aislante magnético, siendo en la práctica unas 10 000 o hasta 100 veces menor que la de los materiales ferromagnéticos. Todo esto hace que no se puedan despreciar las pérdidas de flujo para un cálculo fino como sería indispensable por ejemplo transformadores y relés. En cambio, para este documento, dada su naturaleza de justificación cualitativa estas pérdidas no se tendrán en cuenta.

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por tener uno o varios de los siguientes atributos:

- Pueden imanarse más fácilmente que los demás materiales. Ésta característica viene dada por una gran permeabilidad relativa.
- Tienen una inducción magnética intrínseca máxima, muy elevada. Es decir, tienen la capacidad de convertirse en imanes permanentes.
- Se iman con una facilidad muy diferente en según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva a una relación no lineal entre los módulos de inducción magnética \mathbf{B} y \mathbf{H} del campo magnético aplicado. Ésta relación se verá más adelante.
- Conservan la imanación cuando se suprime el campo magnético
- Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanados.

La importancia de las propiedades anteriormente citadas varía en función de las aplicaciones que puedan tener los distintos elementos de materiales ferromagnéticos. Para los diseños que se muestran en este documento es especialmente importante la gran permeabilidad relativa de estos materiales.

1.1.4. Curva de imanación y características de los materiales magnéticos

El proceso de convertir un material ferromagnético en un imán no es instantáneo. Este proceso requiere de la aplicación de un campo magnético \mathbf{H} lentamente variable hasta unos valores relativamente grandes. Además el resultado de la imanación, la inducción magnética producida en el nuevo imán \mathbf{B} , depende también de la historia del material y de su proceso de construcción.

Como ejemplo, podemos poner el de un anillo de material ferromagnético en el que está enrollado un hilo por el que se hará circular una corriente eléctrica. Se varía la intensidad del campo magnético \mathbf{H} variando la intensidad de la corriente que circula por el devanado.

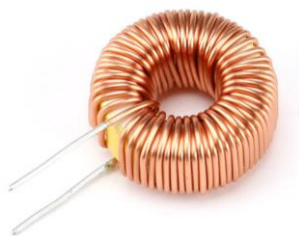


Figura 1 - 4. Bobina toroidal alrededor de anillo ferromagnético.

La imagen anterior ha sido obtenida de la fuente [9].

En la siguiente figura se muestra la curva de imanación de este experimento, llamada curva de histéresis de magnetización:

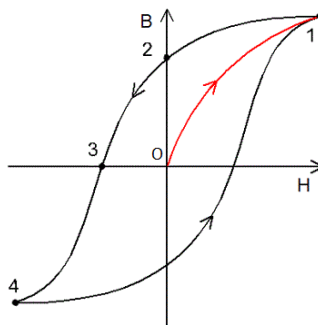


Figura 1 - 5. Curva simplificada de histéresis.

Suponiendo que el material del experimento nunca haya sido magnetizado, si vamos aplicando poco a poco (para evitar corrientes de Foucault) un campo magnético H creciente se obtendrá una curva similar a la curva roja, llamada curva de primera imanación. Si se ha seguido aumentando H hasta que no se ha observado crecimiento en B , se dirá que se ha llegado al punto de saturación.

Si llegados al *punto 1*, se disminuye el valor de H hasta anularlo se llegará al *punto 2*, donde se aprecia que queda una inducción magnética que toma el nombre de magnetismo remanente ó *remanencia* cuyo valor es la longitud del tramo $0-2$.

Para anular la inducción magnética es necesario aplicar un campo magnético en sentido contrario al aplicado anteriormente. Una vez anulada, se llega al *punto 3*. El segmento $0-3$ representa el campo que ha sido necesario aplicar para anular la inducción magnética y recibe el nombre de campo coercitivo.

Haciendo más negativo el campo se llega al *punto 4*. Si ahora empezamos a aumentar el campo volveríamos al *punto 1*.

La figura anterior es llamada curva de histéresis simplificada porque la curva reflejada en este proceso es abierta en un primer momento aunque tras varios procesos con campos idénticos, la curva va tendiendo a estabilizarse en una traza cerrada, donde se puede decir que el material está en su condición de imanación simétrica cíclica.

El fenómeno de la histéresis, término que se traduce como retraso, viene asociado a una disipación de energía, llamada pérdida por histéresis, en el interior del material cuando se producen variaciones del campo magnético como se producen en los transformadores.

De cara a la comparación de materiales de estas curvas se pueden deducir varias propiedades [8]:

- Magnetismo remanente: es la inducción magnética que queda en un material después de anular el campo magnético aplicado.
- Inducción residual, es el magnetismo remanente cuando el material se encuentra en su condición de imanación simétrica cíclica.
- Retentividad: es la inducción magnética que queda en el material después de suprimir un campo magnético suficiente para crear la inducción de saturación. Dicho de otro modo es el magnetismo remanente cuando la curva parte de la condición de saturación.
- Campo coercitivo: magnitud del campo magnético para la cual se consigue anular la inducción magnética cuando el material se imana en condición simétrica cíclica.
- Coercitividad es el campo coercitivo requerido para anular la inducción magnética partiendo de la condición de inducción en saturación.

Mirando la curva, el magnetismo remanente afecta a la longitud del *segmento 0-2* (por decirlo de alguna manera al alto de la curva) y no es más que la imanación propia del imán. En el mercado pueden encontrarse imanes de diferentes materiales y de diferente imanación. Por ejemplo para los imanes de neodimio es habitual encontrarse productos con una imanación N45, siendo más raros, caros y con una fuerza magnética superior los que tienen la imanación N52. Esto quiere decir que para dos imanes de las mismas dimensiones y mismo material el magnetismo remanente será mayor para aquél que haya sufrido una imanación superior, en el ejemplo anterior: el N52.

En cuanto a la coercitividad, esta afecta a lo ancho. Dicho de otra forma, un material será más coercitivo mientras más ancha sea la curva en las inmediaciones del eje de H , quiere decir por tanto que hacen falta unos campos mayores para cambiar o alterar las propiedades magnéticas del material. Si por el contrario nos encontramos una curva estrecha ese material será fácilmente magnetizable y desmagnetizable.

A veces es usada la referencia: material magnético duro o blando. Normalmente no se quieren referir con esto a la dureza propia del material sino a su capacidad coercitiva. Dicho de otro modo a su capacidad para mantener la inducción magnética ante campos magnéticos externos. Por tanto, cuando se refieren a un material duro se quiere decir que ese material es un material de alta coercitividad; y lo contrario, si se refieren a un material blando.

1.1.5. Imán electropermanente

Un imán electropermanente es un tipo de imán permanente en el que el campo externo que crea se puede activar y desactivar mediante un pulso de corriente eléctrica [10]. El imán se compone de dos tramos: uno de alta coercitividad y otro de baja coercitividad, de manera que la dirección del campo magnético del material de menor coercitividad se puede cambiar por un pulso de corriente a través de un hilo que rodea a éste, provocándole un rápido proceso de histéresis debido su baja coercitividad.

Cuando los dos tipos de materiales tienen magnetizaciones opuestas, el campo magnético neto es nulo, por el contrario cuando sus campos propios están alineados sí producen un campo exterior, teniendo así la capacidad de atraer objetos ferromagnéticos.

La ventaja fundamental de este tipo de imanes es que se asemeja al funcionamiento de los electroimanes, en el sentido que se pueden activar y desactivar, pero con un consumo mucho menor a largo plazo ya que, teóricamente sólo consumen electricidad cuando se hace la permutación de la magnetización.

El funcionamiento de estos imanes está basado en la configuración de cierre magnético, en el cual esta condición de campo magnético externo encendido o apagado es conseguida mediante el uso de imanes permanentes.

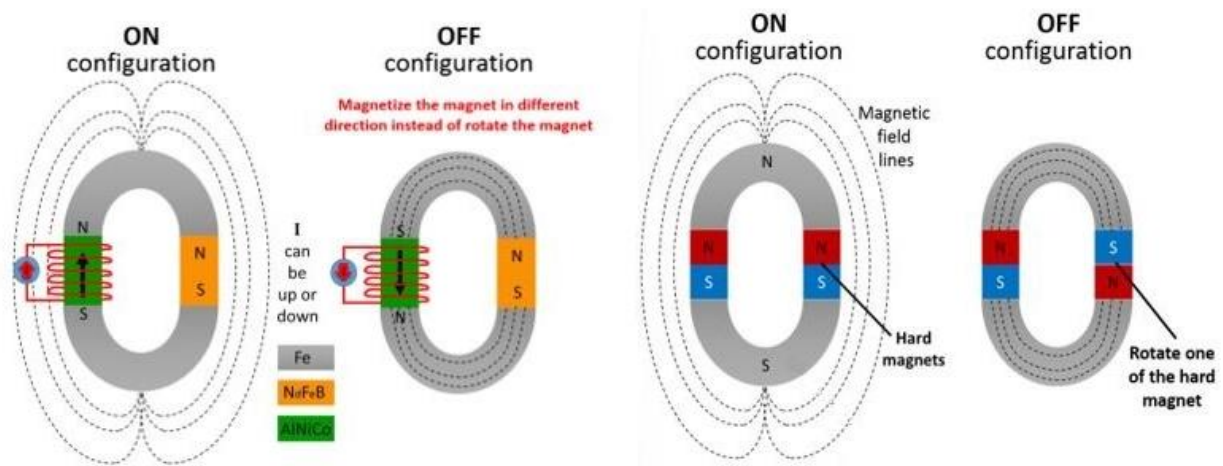


Figura 1 - 6. Esquema funcional de imán electropermanente y del cierre magnético.

La imagen anterior ha sido obtenida de la fuente [10].

En la figura anterior se aprecia el funcionamiento de ambos montajes: a la izquierda el imán electropermanente y a la derecha el cierre magnético. Se pueden notar rápidamente sus similitudes.

Se aprecia que el cierre magnético es una construcción simple y robusta que es posible realizar con dos imanes y dos trozos de hierro. Esta tecnología se conoce desde hace tiempo, como evidencian numerosas patentes [11] y el hecho de que ha sido utilizada ampliamente en la industria, como por ejemplo para levantar cargas de material ferromagnético y en los mandriles para soportar piezas de acero en fresadoras.

1.2. Antecedentes

En el año 2017 tuvo lugar la anterior edición del “Mohamed Bin Zayeb International Robotic Challenge” organizada por “Khalifa University”. La final la disputaron 25 de los 143 equipos que lo solicitaron. El equipo Al-Robotics, en el cual formaba parte el Grupo de Investigación para la Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla, fue uno de éstos 25 [12].

A continuación se exponen resumidamente, el punto de partida que esto constituye.

1.2.1. Descripción del “Challenge 3” del MBZIRC 2017

Este reto consistía en usar un equipo de hasta 3 vehículos aéreos no tripulados, UAV (del inglés *unmanned aerial vehicle*) para localizar, transportar y arrojar, en una zona determinada o caja, una serie de objetos, todos de material ferromagnético, que podían estar fijos o móviles dentro de un espacio determinado.

Había dos tipos de objetos según su tamaño:

- Pequeños, que podían ser de color verde, azul o rojo para los fijos; y amarillo para los móviles. Éstos últimos se situarían sobre una plataforma móvil que los distanciaba del suelo, como aparece en la figura siguiente.
- Grandes, que eran rectangulares, de color naranja y fijos. Podían tener un peso máximo de 2 kg y podían ser transportado por hasta 2 UAVs.



Figura 1 - 7. UAV aproximándose a disco móvil.

La duración del ejercicio era como máximo de 20 minutos. Los UAV debían tener un tamaño máximo de 1,2x1,2,0,5 metros teniendo una velocidad máxima de 30 km/h; y podían estar equipados con efectores magnéticos o de cualquier otro tipo para coger los objetos.

1.2.2. Equipamiento y pesos

En este apartado se enumerarán y describirán los distintos dispositivos que se usaron para afrontar el reto. También se explicará resumidamente su funcionamiento.

En primer lugar, se calculó el peso de los UAV considerando el peso máximo de los objetos de la competición y teniendo en cuenta que los objetos mayores podían ser transportados por 2 UAV. También se consideró que lo más conveniente era montar el mismo equipo en todos los drones por lo que el peso sería idéntico.

Por consiguiente, en una primera estimación de los límites en cuanto al peso se estimó que el peso de la plataforma sería de 2.5 kg: 1 kg para la carga (para la mitad del objeto mayor), 1 kg para la electrónica y sensores (ordenador de a bordo, cámara, baterías, conector inalámbrico); y 0.5 kg para el mecanismo de cogida.

Con estas especificaciones, y después de revisar varios modelos y hacer varias pruebas se optó por un diseño propio, diseñado codo con codo con la compañía española DroneTools². La plataforma final fue la que puede

² <https://www.dronetools.es/>

verse en la siguiente figura, hecha en fibra de carbono con un tamaño de 1.18x1.18x0.5 m, incluyendo las palas de los rotores.



Figura 1 - 8. UAV o plataforma usada para la edición 2017.

El procedimiento para validar la plataforma fue llevado a cabo en Sevilla en la temporada de verano, lo que conlleva una temperatura ambiental de 30°C, muy similares a las condiciones climáticas de Abu Dabi. La prueba fue la siguiente:

1. Navegar de forma autónoma en un vuelo rectangular de 200m de largo.
2. Recoger y depositar manualmente objetos metálicos continuamente, hasta que las baterías llegaron al 10% de carga.
3. Se le cargó un peso muerto equivalente al peso total de la electrónica
4. Chequear el tiempo de vuelo y la temperatura de los motores.

Después de varias pruebas y configuraciones distintas, se optó por motores sin escobillas T-Motor Antigravity MN4006 380kV, hélices de 15x5 de fibra de carbono, JETI 40 A Opto ESC (Electronic Speed Controller) y 2 Tattu batteries (7,000 mAh 22.2 V 25/50C 6S1P). Por otra parte se mantuvo el siguiente equipamiento que incluía el aparato: un controlador de vuelo Pixhawk, una placa receptora de GPS (3DR uBlox LEA-6H High-Performance Receiver), un radio transmisor radio control y un radioenlace de 433 MHz para comunicaciones con la estación de control terrestre, ejecutada en un ordenador.

Con esto, se consiguió una autonomía de 23 minutos con una temperatura de motores normal.

Una vez validada se le montó la electrónica:

- Ordenador de abordo: Un ordenador Intel NUCi7RYH con 16GB de RAM y un disco duro de 256 GB Samsung 950 PRO M.2 SSD. Éste ordenador pesa 1.1 kg, principalmente por la carcasa metálica, por lo que fue reemplazada por una carcasa de plástico propiamente diseñada para reducir el peso en 460g (Figura 5). El ordenador está conectado al controlador de vuelo Pixhawk mediante puerto serie y montado en un sistema de montaje rápido por lo que puede ser fácilmente sustituido.
- Cámara: una cámara estero ZED fue elegida después de varias pruebas. La cámara se conecta al ordenador mediante un puerto USB 3.0 al ordenador de a bordo.
- Altímetro: Un altímetro laser Ligthware SF11C está integrado y directamente conectado al Pixhawk. Proporciona una medida complementaria al altímetro barométrico incluido en el Pixhawk.

- Conector inalámbrico: Un Ubiquiti Rocket M5 5.8 GHz es usado para las comunicaciones con la estación terrestre y los demás UAV. Éste dispositivo es conectado mediante arquitectura Ethernet al ordenador de a bordo.
- Baterías electrónicas: Una Hacker ECO-X Light 4S 3.500 mAh 10C como batería independiente para la electrónica.
- Mecanismo de cogida: Un dispositivo de recogida basado en un OpenGrab EPM (Electro Permanent Magnet) de NicaDrone (Se explicará con detalle en la sección 1.1.3)

Con todo esto, la distribución de pesos queda como sigue en la siguiente tabla.

Tabla 1–1 Distribución de pesos en UAV edición 2017

| Categoría | Componente | Peso (g) |
|--|--|----------|
| Fuselaje o chasis | Brazos, motores, controlador de vuelo, enlace radio control y telemetría | 2,800 |
| | Baterías de potencia | 1720 |
| Electrónica específica para el reto | Ordenador de a bordo | 460 |
| | Cámara | 170 |
| | Conector Wireless | 280 |
| | Batería para electrónica | 300 |
| | Altímetro laser | 40 |
| Mecanismo de cogida | Soporte de fibra de carbono y juntas de goma | 210 |
| | Dispositivo electromagnético | 160 |

Queda mencionar que para afrontar el reto, no sólo son necesarios los 3 UAV sino que además se implementó una estación terrestre encargada de los procesos computacionales más complejos, como son el procesamiento de imágenes y la ejecución de un programa planificador que da órdenes a cada UAV.

El procesamiento de imágenes se hacía con el conjunto de imágenes proporcionadas por las cámaras de los 3 UAV en conjunto y basándose en el color, dado que el propio color de los diferentes objetos era conocido. A partir de las imágenes y de los datos GPS del momento en que era tomada la imagen era capaz de proporcionar datos como la posición y velocidad de los objetos.

Por otro lado el planificador era el responsable de coordinar los UAV solventando posibles problemas de seguridad como pueden ser las colisiones y las velocidades de los vehículos.

Además en cada UAV se implementó una máquina de estados encargada de las diferentes funciones de los aparatos: despegar y aterrizar, cambiar su altura respecto del suelo, llevarlo a una posición distinta, barrer el terreno de la competición para encontrar los objetos, activar y desactivar el mecanismo de cogida, llevarlo hasta la zona de recogida y dejar al aparato en una posición de espera en pleno vuelo. Los comandos que desembocaban en estas acciones eran mandados de forma autónoma desde el programa planificador en la estación terrestre.

1.2.3. Mecanismo de cogida

Dada la naturaleza ferromagnética de los objetos, un electroimán parecía ser la opción más simple. Sin embargo esta elección hubiera llevado consigo un consumo excesivo de las baterías, lo que llevaría a unas baterías mayores y a un peso mayor, por lo que se optó por un imán electropermanente.

Para poner en relieve el consumo excesivo de los electroimanes, hemos comparado el imán electropermanente

que se usó con un electroimán comercial³ de características: un peso de 24g, una fuerza de sujeción de 2,5 Kgf⁴ con un consumo 240 mA a 12 V, lo que resulta en 2,88 W.

Por otro lado, el dispositivo usado para el mecanismo de cogida de la pasada edición fue un OpenGrab EPM V3 R5C de NicaDrone⁵ (Figura 1 - 9). Este imán es uno de los pocos imanes electropermanentes destinados a su uso con drones, la gran mayoría de éstos imanes son de mayor tamaño y con aplicaciones industriales.

Con un peso de 65 gramos daba una fuerza de cogida mínima de 200 N y una fuerza típica de 300 N, que convertido a kilogramo-fuerza resulta una fuerza de 20,3943 Kgf y 30,5915 Kgf⁶, respectivamente. A priori más que suficiente para levantar por sí mismo cualquier objeto de la competición.



Figura 1 - 9. Vista superior e inferior del OpenGrab EMP V3 R5C.

Fijándonos en el consumo, el dispositivo necesitaba de 10 mA además de un pico de hasta 1 A durante la conmutación encendido/apagado del campo magnético con una duración de unos pocos milisegundos. Con una alimentación típica de 5 V, resulta en una potencia de 0,05 W y de 5 W, respectivamente.

La diferencia de ambas alternativas resulta clara: hubieran tenido que montar 12 electroimanes para conseguir la misma fuerza de sujeción típica del electropermanente, ello conllevaría un consumo de 2.88 A y de 34,56 W con un peso de 0.288 Kg. Éstos cálculos pueden diferir de la realidad, sin embargo dada la notable diferencia entre los resultados de ambas posibilidades, optaron por el uso del imán electropermanente.

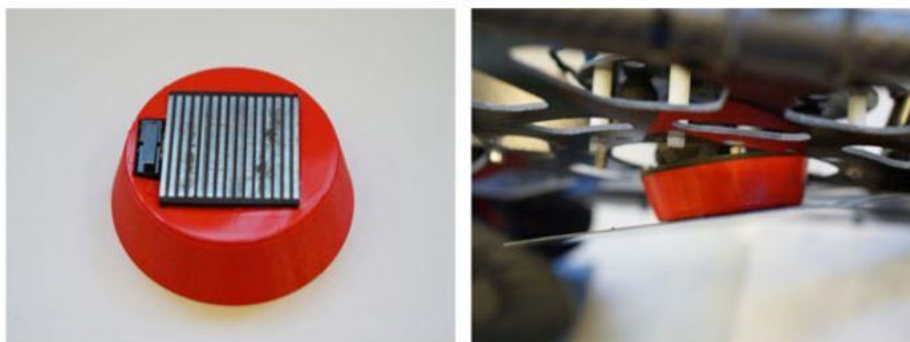


Figura 1 - 10. Dispositivo de cogida de los objetos.

Como se puede ver en la imagen anterior, el dispositivo se montó en el interior de un soporte tronco cónico. Junto a él se acopló un interruptor (en la fotografía se sitúa a la izquierda del imán) que actuaba como sensor de

³ <https://www.amazon.es/el%C3%A9ctrico-elevaci%C3%B3n-electroim%C3%A1n-solenoides-20x15mm/dp/B00M2QRLC0> (24/8/2019)

⁴ No sabemos el valor de la aceleración de la gravedad tomado por el fabricante del electroimán, por lo que los resultados pueden variar ligeramente.

⁵ <https://nicadrone.com/> (24/8/2019)

⁶ Se ha tomado como aceleración de la gravedad: 9,80665 m/s² para el cálculo de la fuerza de sujeción del imán electropermanente.

contacto. Aplicándole un filtrado paso alto a la lectura se usó como sensor de cogida.

El soporte a su vez se acopló a la plataforma inferior de fibra de carbono mediante unos amortiguadores flexibles de goma que permitían que la orientación del imán variara para asegurar un agarre plano a la superficie del objeto en todo momento. Este acoplamiento a la estructura se hizo ya que se observó una gran pérdida de rendimiento con cualquier mínimo espacio entre la superficie del imán y el objeto a agarrar. En la siguiente imagen se muestra la flexibilidad del montaje.

Con esta configuración se consiguieron buenos resultados en las pruebas realizadas en Sevilla con una tasa de éxito de casi el 100%, consiguiendo además que los objetos no cayeran en el transporte. Estos objetos de prueba fueron creados en Sevilla con los datos proporcionados de la competición, si bien, la organización del concurso no proporcionó ninguno propio de la competición para que se realizaran pruebas con ellos por lo que el diseño era sensible a la condición de los objetos propios de la competición.

En las pruebas previas a la competición, ya en Abu Dabi, se observó que el mecanismo no era capaz de elevar estos objetos. Este comportamiento, no fue previsto ya que a priori se disponía de suficiente fuerza de sujeción. Como se ha mencionado previamente, al no poder hacer pruebas previas al desplazamiento al sitio de la competición, no se pudieron subsanar estos problemas. Posteriormente se ha pensado que la causa residía en la capa de pintura de los objetos que bien por ser demasiado gruesa o por ser conductora, podía variar la actuación notablemente.

Esta nueva condición forzó al equipo a crear un nuevo sistema in situ. Dado el escaso margen de tiempo y recursos que se pudieron transportar, se tuvo un reducido margen para analizar y maniobrar. Por ello se construyó un nuevo mecanismo más simple. El nuevo mecanismo se muestra en la siguiente figura.

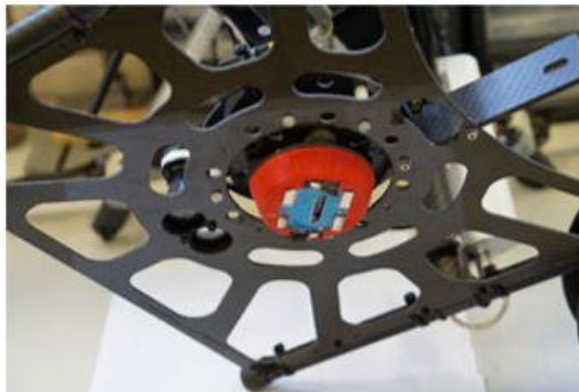


Figura 1 - 11. Dispositivo creado en el sitio de la competición.

Constaba de 4 imanes permanentes de neodimio alojados en las esquinas el espacio del imán electropermanente. Con ellos se proporcionaban la sujeción. Para soltar los objetos se accionaba un servomotor con una palanca acoplada que despegaba el objeto.

La tasa de éxito del mecanismo fue muy pequeña ya que los no se disponía de unos imanes de mayor potencia. El dispositivo era capaz de levantar los objetos en un primer momento aunque éstos caían unos instantes después.

Esta problemática se ha tenido en cuenta para los diseños de este documento.

1.3. Metodología

En esta sección se expone la metodología usada para llevar a cabo este proyecto.

En primer lugar, este proyecto, ha supuesto un proceso de aprendizaje y evolución personal a nivel de conocimientos teóricos y prácticos. Con cada problema y nuevo enfoque se han ido buscando soluciones o alternativas no sólo a nivel del diseño y la construcción sino también a nivel de utilización de programas informáticos.

Todos los diseños se han generado primeramente usando el programa de modelado Solid Edge ST9, que proporciona una gran maniobrabilidad y una interfaz sencilla y clara para la creación de objetos. También proporciona un buen soporte para crear ensamblajes de objeto.

Una vez diseñado el prototipo, se han fabricado físicamente con las impresoras 3D: Ultimaker 2+ y BCN 3D sigmax, propiedad del GRVC.

Una vez fabricadas, se han montado y probado. También se han remodelado si ha sido necesario, hasta conseguir una versión más satisfactoria.

Para las piezas no creadas mediante la impresión 3D, algunas de ellas han sido compradas o creadas directamente en el taller del laboratorio.

Finalmente de cara a la validación de los diseños finales, se han usado dos vías diferentes: se han probado manualmente; por otro lado, para la justificación teórica de los mismos se han usado programas basados en el método de los elementos finitos aplicados al magnetismo con el fin de aportar una mejor comprensión al proceso que tiene lugar en el dispositivo.

Para el accionamiento de los mecanismos se han usado, a grandes rasgos, dos opciones: en un primer momento de prueba se han accionado manualmente para aportarnos una primera impresión; posteriormente se ha usado la plataforma de prototipado de código abierto Arduino accionarlo.

Debo mencionar que no todas estas fases han sido llevadas a cabo en todos los diseños. El avance de los diferentes diseños por estas fases estaba sujeto a la continua revisión del propio diseño y la búsqueda de mejores alternativas, por tanto, la mayoría se han ido descartando conforme se encontraban mejores opciones.

Todo este proceso se expondrá cronológicamente con cada diseño, junto con las decisiones tomadas en su evolución.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL RETO PARA LA EDICIÓN 2020

En esta sección se expone la descripción del reto para la edición del MBZIRC 2020, así como las especificaciones que deben cumplir los diseños.

2.1. Challenge 2 MBZIRC 2020

Con motivo de la participación del Departamento de Robótica de la Universidad de Sevilla en el concurso de robótica MBZIRC 2020 (Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge) se han estudiado diferentes prototipos para acometer el “Challenge 2” de este concurso.

En este reto un equipo formado por hasta 3 UAVs y un UGV (del inglés *unmanned ground vehicle*, vehículo terrestre no tripulado) deben, de manera autónoma, localizar, recoger, transportar y colocar unos ladrillos de material ferromagnético de diferente tamaño, peso y color formando una estructura según un determinado patrón. Algunos de los objetos, por ejemplo el azul, debe ser colocado por uno de los UAV. En la siguiente imagen puede verse una recreación virtual de lo descrito anteriormente.

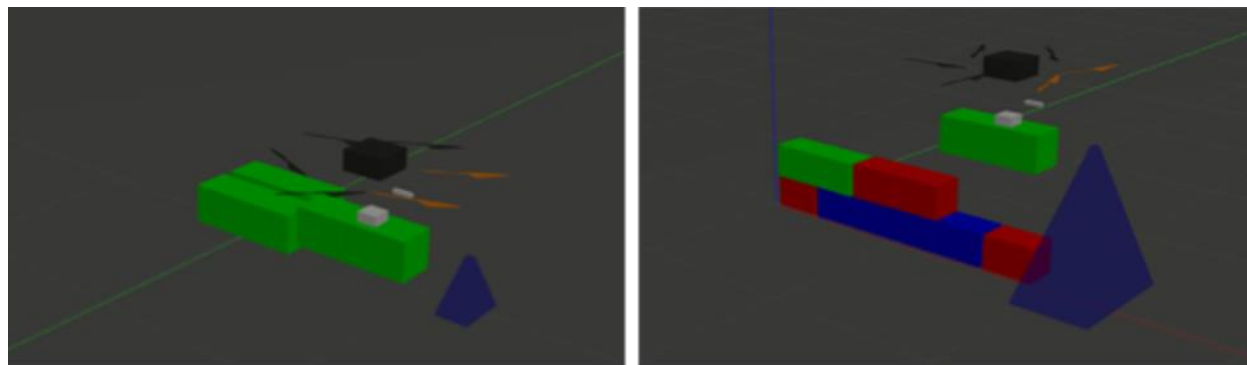


Figura 2 - 1. Recreación virtual del “Challege 2” de la edición 2020

Todo esto se debe hacer en el exterior dentro de una zona delimitada de 50mx60m. Dentro de esta zona habrá 4 pilas de bloques del mismo tamaño colocadas aleatoriamente, además de la marca donde se debe empezar a crear la estructura. Para el desarrollo de este reto se dispondrá de 30 minutos.

Las características de los ladrillos son mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 2. Características de los objetos del MBZIRC 2020.

| Color | Peso | Tamaño |
|----------------|--------|--------------|
| Naranja | 2,0 kg | 180x20x20 cm |
| Azul | 1,5kg | 120x20x20 cm |
| Verde | 1 kg | 60X20X20 cm |
| Rojo | 1kg | 30x20x20 cm |

El objeto naranja se ha pensado que sea recogido por el UGV (Figura 2 – 2.), en el que se equipará un brazo

robótico, ya que es la opción más simple aunque también podría ser llevado por dos UAV. El resto de objetos serán llevados por uno de los UAV y son por tanto los objetos en los cuales nos centraremos para el desarrollo del proyecto.



Figura 2 - 2. UGV equipado con brazo robótico.

Como se puede apreciar es una evolución del reto de la pasada edición, expuesto en la **sección 1.2.1. Descripción del “Challenge 3” del MBZIRC 2017.**

2.2. Modelos de los bloques creados para pruebas.

Para las pruebas previas a la competición se han construido modelos de los bloques azul, verde y rojo. Se han construido con las mismas dimensiones usando poliestireno expandido (EPS) unido a una placa de acero laminado de 0,3mm de espesor que cubre por completo una de las caras mayores de cada bloque. Los modelos creados pueden verse en la siguiente imagen.



Figura 2 - 3. Modelos de los bloques.

2.3. Requisitos

En esta sección se describen los requisitos que se ha pensado que debe cumplir el sistema de agarre o cogida de los bloques.

2.3.1. Fuerza de sujeción

El sistema debe ser capaz de soportar el despegue con el bloque, su transporte y su colocación. Debe proporcionar una forma de sujeción cuya fuerza o fuerzas implicadas sostengan los objetos y no comprometan estabilidad del sistema.

En algunas determinadas situaciones en las que el sistema no sea capaz de asegurar la fijación del objeto, el dispositivo de cogida debe minimizar los efectos que lleven a esta situación teniendo cierto margen de seguridad.

2.3.2. Resistencia al deslizamiento

El sistema debe tratar de evitar el movimiento de los objetos durante el vuelo. Es decir, la carga no debe moverse

con respecto al UAV durante su transporte.

Como en la sección anterior, en las situaciones en las que este aspecto sea inevitable al menos debe minimizarse.

2.3.3. Sensores

Un aspecto a tener en cuenta, es conocer si se ha producido una sujeción. Se añadirá un sistema de media de la cogida.

Este sensor medirá si el contacto se ha producido, y si se mantiene este durante el transporte. También medirá si se ha producido el desacople del objeto cuando sea necesario que se produzca.

2.3.4. Control del dispositivo

El control del dispositivo debe hacerse de manera que se maximice su rendimiento.

2.3.5. Peso y tamaño

Dado que el sistema se va a montar en una aeronave, el peso juega un papel crucial. Se tratará de minimizar el peso de todos los componentes. Esto incluye todos los elementos del sistema de cogida, sensores, sistema de procesamiento para el control y demás elementos auxiliares.

En cuanto al tamaño, también se tratará de minimizar el tamaño de los elementos pues el espacio en la plataforma es reducido.

CAPÍTULO 3. IMPLICACIONES FÍSICAS Y PÉRDIDAS DE RENDIMIENTO

En este capítulo se explican los diferentes aspectos físicos que afectan a los diseños. Finalmente, en el apartado de pérdidas de rendimiento se engloban las diferentes contribuciones adversas para el funcionamiento óptimo de los diseños estableciendo un margen de seguridad que asegure el agarre del objeto.

3.1. Desempeño de la fuerza de sujeción

Debido a las limitaciones de peso que han conllevado en el diseño de sistemas simples y a la distribución del material ferromagnético en los modelos, se ha analizado el efecto de una fuerza de sujeción aplicada íntegramente en la superficie de los bloques.

El dispositivo diseñado debe tener la capacidad de levantar el objeto, a ser posible con un holgado margen dando mayor robustez para contrarrestar las fuerzas que puedan surgir durante el vuelo y asegurar la estabilidad.

Dado que de los bloques destinados a los UAV, el de mayor peso \vec{P} es el azul con 1,5 kg de peso, deberá aportar como mínimo una fuerza \vec{F} de 1,5 kgf. Sin embargo, veremos que dependiendo de la situación se necesitará una fuerza mayor.

En este apartado se explicará la situación que el objeto a transportar experimentará durante el despegue vertical, transporte y colocación del objeto; y veremos el papel que juega la fuerza de sujeción en cada situación.

Dado que el objetivo del dispositivo es mantener el objeto fijado e inmóvil durante el vuelo se explicará con detalle las fuerzas que tienen lugar en cada situación; en especial, se hará hincapié en el papel desempeñado por la fuerza de sujeción.

La función del dispositivo en las siguientes situaciones será la de aportar la suficiente fuerza de sujeción para superar todas las situaciones siguientes.

Para todas las explicaciones se harán sobre un sistema de referencia inercial.

3.1.1. En el despegue

La situación de despegue es mostrada en la siguiente imagen.

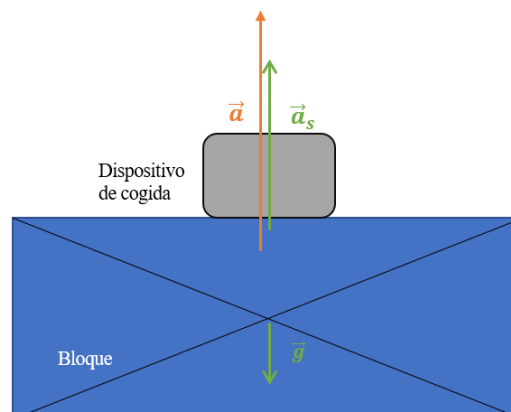


Figura 3 - 1. Aceleraciones sufridas por el bloque durante el despegue.

Durante el despegue el UAV sube con una aceleración neta \vec{a}_s . Manteniendo la condición de inmovilidad del bloque con respecto al UAV, el bloque sufrirá la misma aceleración neta. Esta aceleración es el resultado de la suma vectorial de todas las aceleraciones que sufrirá el bloque, las cuales son: la aceleración de la gravedad \vec{g} y la aceleración producida por el dispositivo de cogida sobre el bloque, \vec{a} .

$$\vec{a}_s = \vec{a} + \vec{g} \quad (4)$$

Despejando del módulo de la aceleración que debe aportar el dispositivo de cogida resulta:

$$a = a_s + g \quad (5)$$

Como consecuencia de esto la fuerza que el dispositivo debe aplicar al bloque durante el despegue debe ser mayor al propio peso del bloque.

3.1.2. Durante el transporte

Debido que tanto el paso, como las direcciones de las hélices usadas comúnmente en los multirrotores son fijos, se consigue que el UAV se mueva en una dirección determinada variando la velocidad de giro de los motores. Esto provoca una inclinación del aparato que debe ser analizada también para el transporte de los objetos.

La situación más desfavorable durante el vuelo será en una posición inclinada con respecto a la horizontal (ángulo α), moviéndose en una determinada dirección a una velocidad (\vec{v}) y habiendo agarrado al objeto a una cierta distancia de su centro de gravedad. Debido a la resistencia con el aire que lo rodea, el objeto sufrirá una fuerza dependiente de la velocidad del sistema \vec{F}_v que formará un ángulo β con la dirección normal a la superficie de contacto.

Esta situación descrita en la siguiente figura, origina fuerzas y momentos de fuerza que deberán ser contrarrestados por el dispositivo.

Aclaremos que, la dirección y módulo de \vec{F}_v dependerá de la geometría y velocidad del sistema. En las siguientes explicaciones \vec{F}_v se mostrará en la dirección más probable y su contribución se juzgará en la situación más desfavorable.

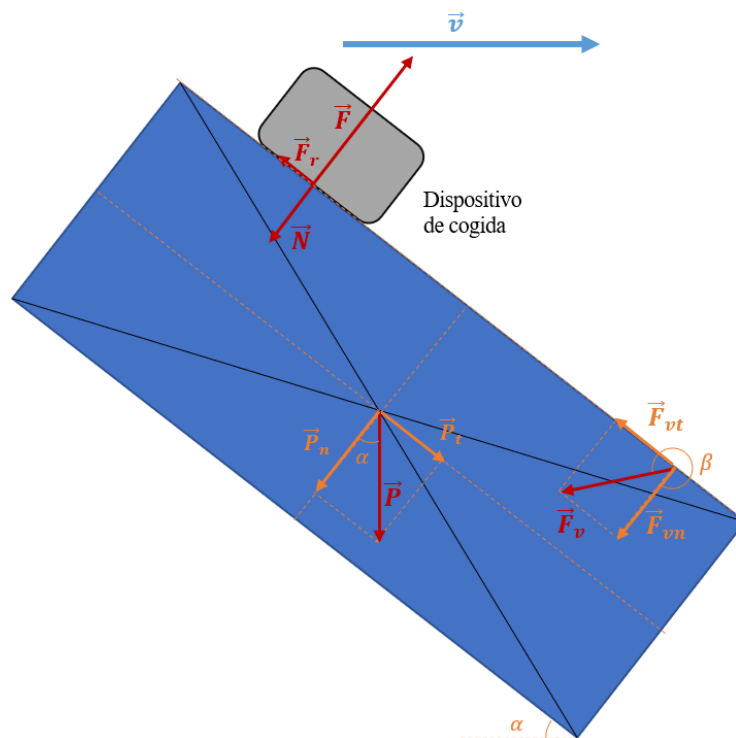


Figura 3 - 2. Diagrama de fuerzas durante el vuelo.

Fuerza de sujeción

Aplicando el equilibrio de fuerzas en el objeto y en las dirección normal a la superficie del mismo (ecuación (6)) se aprecia que la fuerza de sujeción debe compensar las componentes normales del peso \vec{P}_n y de la resistencia aerodinámica \vec{F}_{vn} y de la fuerza normal \vec{N} para asegurar el equilibrio de fuerzas en esta dirección en consecuencia la fuerza de sujeción debe ser mayor.

$$\vec{F} + \vec{P}_n + \vec{F}_{vn} + \vec{N} = 0 \quad (6)$$

Haciendo referencia a los módulos:

$$F = P_n + F_{vn} + N \quad (7)$$

Despejando la fuerza de sujeción, nos queda:

$$F = P \cos(\alpha) + F_v \cos(\beta) + N \quad (8)$$

La fuerza de sujeción debe ser capaz de compensar que la dirección de F_v se acerque a la normal [$\cos(\beta) \approx 1$] y que su módulo sea máximo. Esto ocurrirá cuando la velocidad del sistema se iguale a la velocidad máxima permitida durante la competición.

La aportación del peso se supone subsanada si la fuerza de sujeción ha sido capaz de mantener la integridad del sistema durante el despegue.

El valor de la fuerza normal depende del resto de fuerzas y aumenta con el valor de la fuerza de sujeción como se muestra en la ecuación (9).

$$N = F - P_n - F_{vn} \quad (9)$$

Resistencia al deslizamiento

La fuerza de sujeción asegura su fijación normal a la superficie por lo que, se debe producir una fuerza que asegure o al menos minimice la capacidad del objeto de desplazarse tangencialmente.

Se adelanta que los dispositivos diseñados serán de naturaleza magnética. Como ha sido mencionado en la sección 1.1.2. **Corrientes de Foucault**, el movimiento relativo de la superficie conductora originaría corrientes de Foucault. Resultaría, por tanto, una fuerza que se oponga al movimiento y que actuará de freno magnético en el objeto. Sin embargo, este aspecto no se tendrá en cuenta para el diseño debido a que diseño de los prototipos se ha hecho bajo la hipótesis de que los objetos se mantengan fijos con respecto al dispositivo por lo que, si este aspecto se cumple no se crearán corrientes de Foucault.

Sin otras fuentes de fuerza, la fuerza de rozamiento estático entre el dispositivo y la chapa de los objetos será crucial. La fuerza de rozamiento dependerá del coeficiente de fricción estático μ_e . Sin embargo, no tenemos información acerca del coeficiente de fricción que tendrán los objetos de la competición. Por ello, se trabajará con el coeficiente de fricción propio de las superficies de los modelos sin modificar el contacto entre ellas. Por otro lado, cualquier mínimo espacio entre un dispositivo magnético y el material ferromagnético ocasiona grandes pérdidas de sujeción por lo que es desaconsejable añadir material con poca permeabilidad relativa entre el dispositivo y el objeto, como se verá más adelante.

En resumen, las fuerzas implicadas son las siguientes:

$$\vec{F}_r + \vec{P}_t + \vec{F}_{vt} = 0 \quad (10)$$

Desgranando el valor de la fuerza de rozamiento y haciendo referencia a los módulos, nos queda:

$$\mu_e N + F_{vt} = P_t \quad (11)$$

Sustituyendo la ecuación (9) en (11):

$$\mu_e (F - P_n - F_{vn}) + F_{vt} = P_t \quad (12)$$

$$\mu_e F + F_v \sin(\beta) = \mu_e P \cos(\alpha) + \mu_e F_v \cos(\beta) + P \sin(\alpha) \quad (13)$$

En esta última ecuación se refleja la significativa dependencia del sistema con respecto a los ángulos α y β . La aportación de la fuerza de sujeción es reducida (típicamente $\mu_e < 1$), por lo que ambos ángulos pueden

controlarse reduciendo la velocidad a la que se mueve el sistema.

Lugar de sujeción

El lugar donde se agarre el objeto resulta crítico pues no sólo es necesario el equilibrio de fuerzas sino también el equilibrio de momentos para asegurar que no muevan los objetos. Lo ideal es que los momentos de fuerza (\vec{M}_i) creados por las fuerzas implicadas \vec{F}_i sean mínimos. Para ello, es fundamental que la distancia ortogonal entre las fuerzas al eje de giro \vec{d}_i sea lo menor posible.

El sistema de posicionamiento debe hacer que el UAV se sitúe en una posición centrada con respecto al centro del bloque, sin embargo, siempre existirá un error que originará momentos que deben ser compensados por el dispositivo.

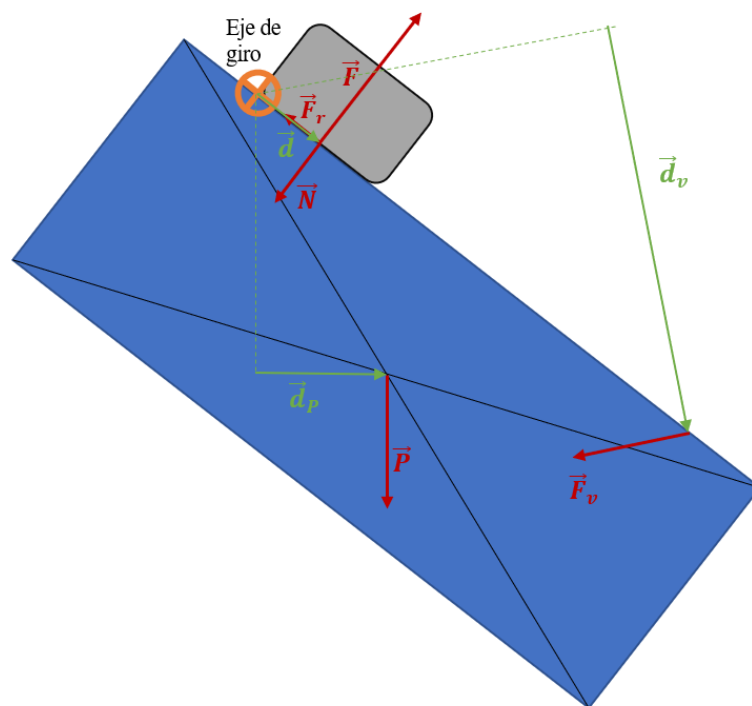


Figura 3 - 3. Diagrama de fuerzas y distancias ortogonales al eje de giro.

En la Figura 2-3 se han representado las fuerzas y sus distancias ortogonales al punto de giro más probable en la situación mostrada. Las fuerzas creadas por el dispositivo deben compensar el momento creado por las demás fuerzas implicadas para asegurar la estabilidad del sistema.

$$\vec{M}_F + \vec{M}_N + \vec{M}_P + \vec{M}_{Fv} = 0 \quad (14)$$

Siguiendo el criterio de la mano derecha y haciendo referencia a sus módulos:

$$M_F = M_N + M_P + M_{Fv} \quad (15)$$

En la ecuación anterior se aprecia claramente que únicamente el momento creado por la fuerza de sujeción M_F es el que compensa el momento de las demás.

Si desglosamos los momentos en sus variables componentes:

$$d \cdot F = d \cdot N + d_p \cdot P + d_v \cdot F_v \quad (16)$$

Si ahora dividimos por d y sustituimos la ecuación (9) en (16):

$$F = (F - P_n - F_{vn}) + \frac{d_p}{d} \cdot P + \frac{d_v}{d} \cdot F_v \quad (17)$$

En esta ecuación se hace una comparación entre las distancias ortogonales de las que depende el sistema.

Si el punto de sujeción estuviera muy alejado del centro del bloque, el momento creado por el peso crecería enormemente en comparación con el resto. Esto haría que el bloque empezara a girar y que la fuerza de sujeción disminuyera debido a la distancia entre el bloque y el dispositivo.

Esta situación debe ser contrarrestada por dos vías: por un lado, haciendo que el agarre sea lo más centrado posible; por otro lado, aumentando la fuerza de sujeción, de manera que el momento creado por ésta sea capaz de contener el efecto adverso descrito anteriormente.

Conclusión

Tanto para el equilibrio de fuerzas como para el equilibrio de momentos, la fuerza de sujeción juega un papel vital para que el objeto se mantenga fijo en su posición.

Como se ha mostrado, no es suficiente con que el dispositivo sea capaz de levantar los 1,5 kg del bloque más pesado, sino que es necesario ampliar su fuerza de sujeción máxima para compensar los efectos de la inclinación del sistema (φ_1), del coeficiente de fricción estático μ_e (φ_2), de la fuerza de resistencia aerodinámica del sistema (φ_3) y de un punto de agarre desplazado con respecto al centro de gravedad del objeto (φ_4).

3.1.3. En el momento de la colocación

Cuando el sistema esté posicionado para colocar los bloques la fuerza de sujeción debe anularse o al menos decrementarse para liberar los bloques y que se desprendan por su propio peso.

$$F < P \quad (18)$$

3.2. Materiales

Debido a las diferentes propiedades magnéticas de los distintos materiales, es lógico pensar que el uso de distintos materiales aportará resultados variados.

En concreto la permeabilidad magnética del material, es decir, la capacidad del material para atraer y conducir campos magnéticos resultará de interés. Se optará por tanto por materiales con una alta permeabilidad magnética cuando sea posible. En la siguiente tabla se muestran diferentes materiales con sus permeabilidades magnéticas absolutas y relativas.

Tabla 3. Permeabilidad magnética relativa de materiales ferromagnéticos comunes

| Material | Composición | μ_r |
|--------------------------|-------------|---------|
| Hierro | 99,95% Fe | 200 000 |
| Hierro al cobalto | 99,8% Fe | 18 000 |
| Hierro | 99,8% Fe | 5 000 |
| Acero al carbono | - | 100 |
| Acero inoxidable | - | 1,03 |

El efecto de un material distinto al hierro puro se englobará en el parámetro φ_5 [14].

3.3. Efecto de la distancia de un imán al material ferromagnético y del espesor del mismo sobre la fuerza ejercida por el imán

En este apartado se describirán dos aspectos que afectan significativamente al valor de la fuerza de sujeción: la distancia de un imán a una placa ferromagnética y el espesor de la misma [15].

Como modelo para la descripción del fenómeno se usará un imán cilíndrico con una fuerza nominal de atracción F_0 que ejerce una fuerza \vec{F} , de módulo F , sobre una placa de hierro puro de unas dimensiones mucho mayores a las del diámetro del imán. La placa está situada a una distancia d de la superficie del imán.

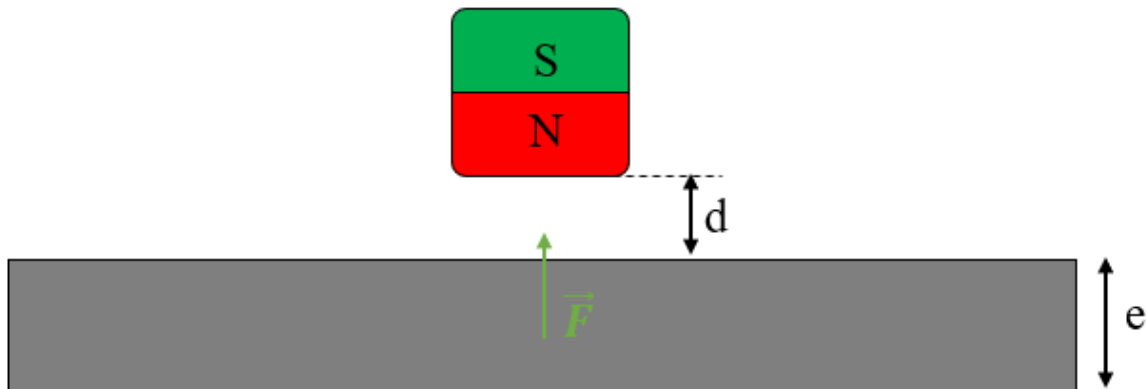


Figura 3 - 4. Fuerza de atracción entre imán y placa de espesor e separada una distancia d .

En la siguientes figuras se ha representado la respuesta del sistema, valor de F , usando imán de neodimio de 10 mm de diámetro y 20 mm de altura con magnetización y otro de 15 mm de diámetro por 3 de alto, ambos con una magnetización N45, ante distintos espesores y distancias. Estos imán serán usado algunos de los diseños.

Cada curva de diferente color (exceptuando las rojas) representa un espesor distinto de la placa. En el eje de las ordenadas se representa el valor de la fuerza de sujeción en kgf y en el eje de las abscisas es para la distancia de separación en mm.

Las curvas rojas representa la respuesta que tendría el sistema si sustituimos la placa por un imán de las mismas características enfrentando las caras opuestas, se ha incluido para comparar su valor con respecto a las demás fuerzas.

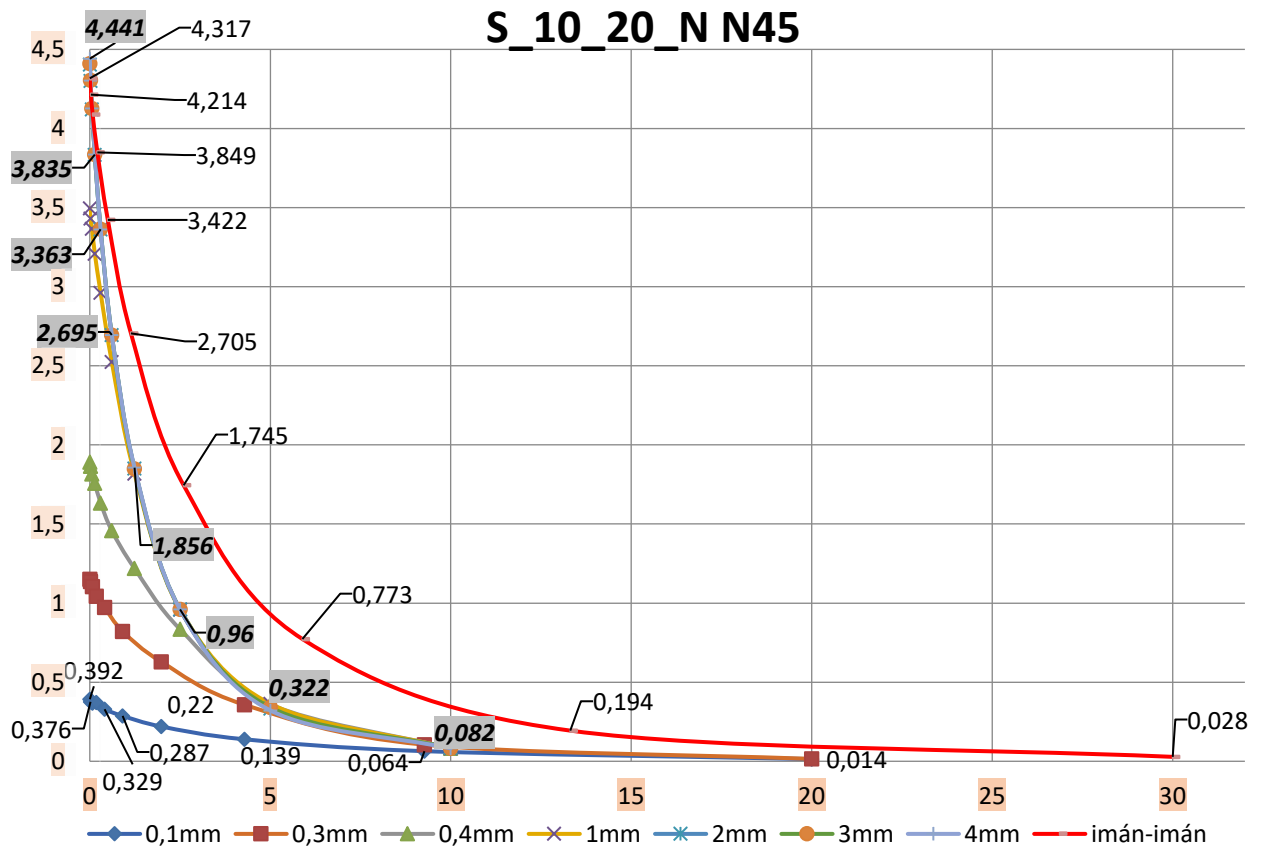


Figura 3 - 5. Gráfica de fuerza de atracción entre imán de neodimio cilíndrico de 10mm de diámetro por 20mm de alto y placa.

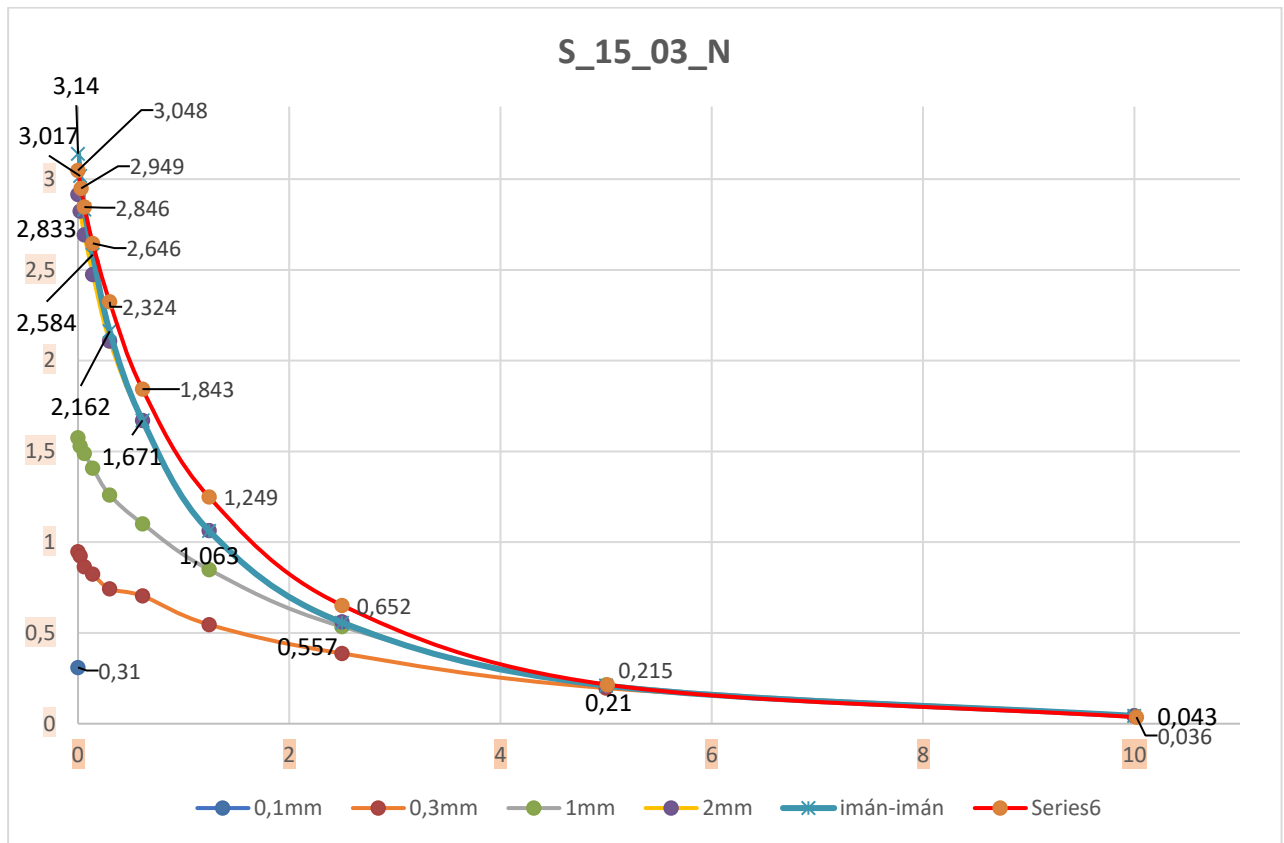


Figura 3 - 6. Gráfica de fuerza de atracción entre imán de neodimio en forma de disco de 15mm de diámetro por 3mm de alto y placa.

3.3.1. Efecto del espesor

Para comparar el efecto del espesor de la chapa nos fijaremos en la tendencia general de la curva y en los valores máximos en cada curva, a una distancia cero.

Fijándonos en la tendencia general de las curvas se aprecia claramente una tendencia a la baja conforme el espesor de la placa disminuye. También se puede ver que hay un espesor determinado en el que la incidencia del espesor es apenas apreciable.

En las siguientes tablas se pueden ver los valores máximos de cada curva, no mostrados en la figura anterior buscando la claridad de la representación, y su comparación, en porcentaje, con F_0 de cada uno de los imanes.

Tabla 4. Comparativa de los valores máximos de F ante diferentes espesores.

| Cilindro de 20x10 \varnothing mm. $F_0 = 4,4$ kgf. N45 | | | | | | | |
|--|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| e (mm) | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| F (kgf) | 0,392 | 1,15 | 1,891 | 3,496 | 4,405 | 4,41 | 4,441 |
| Porcentaje | 8,9% | 26,13% | 42,98% | 79,45% | 100,11% | 100,23% | 100,93% |
| Cilindro de 3x15 \varnothing mm. $F_0 = 3,2$ kgf. N45 | | | | | | | |
| F (kgf) | 0,31 | 0,948 | 1,575 | 2,916 | 3,14 | - | - |
| Porcentaje | 9,69% | 29,63% | 49,22% | 91,11% | 98,13% | - | - |

Como se puede apreciar en la tabla anterior la incidencia es notable, haciendo que la fuerza debida al imán sea menor o mayor del valor nominal en función del espesor.

Las reducciones son debidas a la escasez de material a atraer por el imán. Por otro lado, el aumento de F con respecto a F_0 es debido a que, debido a la baja coercitividad del hierro, el imán provoca la reordenación de los momentos magnéticos del material creando un nuevo imán (proceso de histéresis). Fijándonos en las gráficas para el espesor de 4mm (resaltada en gris en la gráfica) y la de imán con imán, vemos que esta conversión provoca una fuerza mayor que la de imán con imán a una distancia cero. Para distancias mayores se aprecia que la curva roja queda por encima, es decir, el proceso de conversión pierde notoriedad con la distancia.

Comparando los valores para ambos imanes, se aprecia que el imán en forma de disco sufre una menor atenuación.

Dado que el espesor de la chapa de los modelos es de 0,3mm, tomaremos par el valor del factor de atenuación $\varphi_6 = \{0,2613 ; 0,2963\}$, según usemos el imán cilíndrico o el de forma de disco. Para otros imanes permanentes o electropermanentes de los que no se tengan estos datos, se usará $\varphi_6 = 0,2613$.

3.3.2. Efecto de la distancia

Tomamos como referencia los valores de la curva para 0,3 mm, los cuales son:

Tabla 5. Fuerza y distancia para una placa de 0,3 mm de espesor

| | | | | | | | | | | |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d (mm) | 0 | 0,02 | 0,07 | 0,18 | 0,41 | 0,91 | 1,98 | 4,29 | 9,27 | 20 |
| F (kgf) | 1,15 | 1,137 | 1,104 | 1,044 | 0,972 | 0,822 | 0,629 | 0,357 | 0,105 | 0,015 |

Partiendo de la atenuación provocada por el espesor, se aprecia que la curva sigue la forma de una exponencial decreciente. Este efecto se tratará de limitar haciendo un contacto plano entre dispositivo y objeto, sin embargo, debemos tener en cuenta el efecto de separación de la capa de pintura (φ_7).

3.4. Conductividad de la capa superficial

La capa superficial de contacto del objeto puede afectar notoriamente al comportamiento del dispositivo, eso incluye a la pintura. El efecto de la misma en el espesor ya ha sido expuesto, sin embargo otro efecto notable es la conductividad de la misma.

Adelantamos que algunos de los diseños están basados en el imán electropermanente OpenGrab EMP V3 R5C, el mismo usado en la pasada edición. En las especificaciones del mismo se menciona que se evite el contacto de los elementos metálicos del dispositivo debido a precauciones eléctricas, eso incluye los imanes de la parte inferior.

Se piensa que la conductividad de la capa de pintura de los objetos de la pasada edición pudo ser uno de los motivos determinantes, si no el más determinante, que afectó a la tasa de éxito del mecanismo de agarre. Por ello, en los diseños basados en el imán electropermanente será necesario considerar la conductividad de la capa conductora. No se incluirá este aspecto para confeccionar el margen de seguridad sino que en caso de pintura conductora se deberá optar por otras alternativas.

3.5. Conductividad y aislamiento del campo magnético

Como se ha mencionado anteriormente la permeabilidad absoluta de un material es el parámetro que gobierna la conductividad del campo magnético en el interior de dicho material [8]. Cuando se mezclan distintos materiales la permeabilidad magnética relativa también resulta de interés pues el campo magnético tiende a circular por los materiales con mayor permeabilidad magnética relativa.

Como se menciona en el apartado **1.1.3. Materiales ferromagnéticos** no se pueden obviar las pérdidas de conductividad para un cálculo fino de los efectos del magnetismo. Por ello se incluye este aspecto dentro de las pérdidas que pueden afectar al sistema (φ_8).

3.6. Errores de control

Los errores de control inherentes en cualquier sistema son inevitables, aunque se tratará de minimizarlos. Se tendrán en cuenta con el factor φ_9 .

3.7. Errores dimensionales

Los posibles errores de medición y construcción de los dispositivos pueden afectar a su rendimiento. Este aspecto será contemplado en el parámetro φ_{10} .

3.8. Margen de seguridad para compensar pérdidas de rendimiento

Los numerosos aspectos que afectan al rendimiento deben ser tenidos en cuenta para la creación de los dispositivos. Sin embargo, dependiendo de la naturaleza de los fenómenos físicos anteriormente explicados su efecto puede ser inevitable, difícil de medir o aleatorio, por tanto no queda otra que echar mano de la estimación y del ensayo y error para sobredimensionar la fuerza de sujeción hasta una fuerza máxima $F_{sujeción}$, tratando de compensar todos los efectos adversos con un factor de seguridad (λ).

$$F_{sujeción} = \lambda * P_{Bloque_max} \quad (19)$$

donde $\lambda = \lambda(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9, \varphi_{10})$ y P_{Bloque_max} es el peso del bloque de 1.5kg.

Sin embargo existe un límite, mayor fuerza de sujeción suele implicar un mayor peso de los componentes. Por otro lado, un campo magnético excesivamente potente resulta fuera de controlar, peligroso para la integridad del sistema y contraproducente.

Dicho esto, se adelanta que se usará un factor de seguridad de entre 6 y 12 para los dispositivos finales.

CAPÍTULO 4. DISEÑOS.

En esta sección se mostrarán la evolución cronológica de los diseños del sistema de cogida, así como los motivos de haber descartado la mayoría de ellos y continuar en la búsqueda de un diseño mejor.

4.1. Primer diseño

Dado a las dimensiones de los bloques (de hasta 120 cm) y al mayor peso (hasta 1,5 kg) que se debe transportar se consideró de interés estudiar la opción de poder cambiar la posición de los mismos durante los primeros instantes de vuelo, para así conseguir adecuar la posición del c.d.g. del bloque con respecto a la del UAV.

Por otro lado, se trató de evitar el uso de electroimanes, debido a su consumo, e imanes electropermanentes, debido a los problemas originados en la pasada edición.

Con esta idea en mente surgió el diseño ilustrado en la siguiente figura.

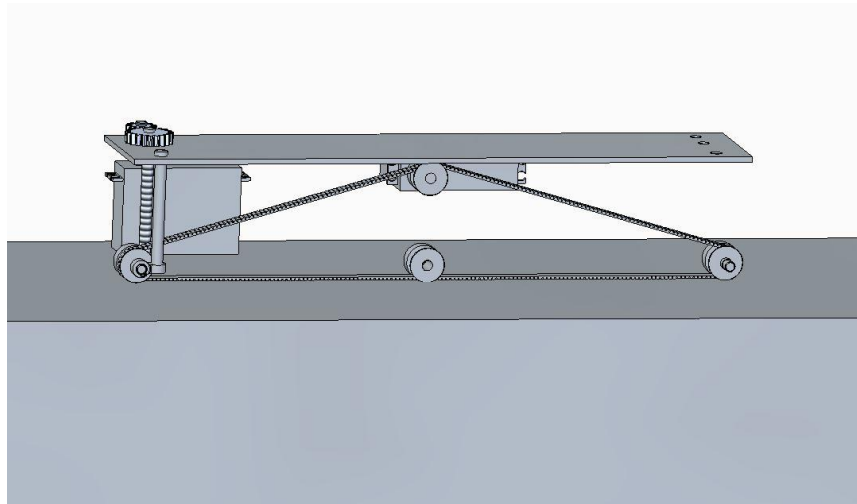


Figura 4 - 1. Detalle de la posición de sujeción del primer diseño.

El diseño estaba basado en una correa imantada encajada en varias poleas que una vez atrapado el bloque lo podría mover longitudinalmente.

Para la creación de la misma se pensó usar una correa cerrada de las usadas por las impresoras 3D donde serían pegados pequeños imanes de neodimio separados por pequeños listones de plástico que se crearían para el proceso, o bien, en dos correas pegadas por la cara sin dientes con los imanes pegados y alojados en la cara dentada de la correa exterior.

La correa iría encajada en 4 poleas de aluminio, de las cuales una sería la motriz, también usadas en las impresoras 3D. Serían necesario el uso de 4 poleas porque la distribución de la correa se cambiaría para permitir liberar el bloque (Figura 4 – 2).

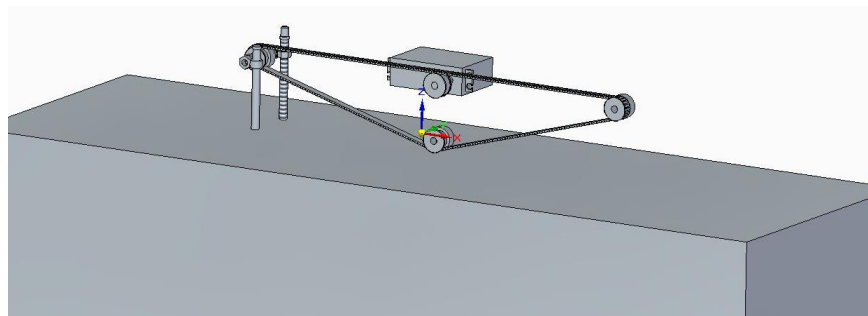


Figura 4 - 2. Detalle de posición de liberación del primer diseño.

El giro de la correa sería accionado mediante un servomotor acoplado a una de las poleas. Para el cambio de distribución de la correa, se haría accionando uno o dos tornillos sin fin, mediante uno o dos servomotores, que elevarían los ejes sobre las que estarían montadas dos de las poleas no motrices.

Por otra parte sería necesario usar un agarre adicional para asegurar la inmovilidad del bloque, se pensó en montar unas patas retráctiles para el UAV con unos agarres de goma colocadas estratégicamente para sujetar y centrar los bloques durante el vuelo.

Se pensó en usar una correa de 610 mm de longitud con una distancia entre dientes de 2 mm y una anchura de 6 mm acopladas a unas poleas que subirían y bajarían 5 cm. Lo que llevaría a usar 305 imanes de neodimio de unas dimensiones máximas de 6x1x1,5 mm que irían pegados con un pegamento flexible a la correa, dos ejes móviles y dos fijos, con sus respectivas tuercas y sujeciones, y un chasis que lo sujete todo.

Es decir, el sistema tendría entre 3 y 4 grados de libertad mecánicos, con lo que el control y la construcción resultarían complicados, y un gran número de componentes.

Conclusiones

A continuación se muestra resumidamente lo explicado anteriormente:

- Un elevado número de componentes, que inevitablemente resulta en un elevado peso.
- Sistema sujeto a 3 ó 4 grados de libertad.
- Necesidad de modificar el sistema de patas retráctiles, para dar estabilidad al sistema

Por todo ello, esta opción se abandonó en las primeras fases de diseño, como se puede deducir de las imágenes en las que no aparecen todos los componentes necesarios para que funcionase el dispositivo.

Se pensó después, en sustituir la correa imantada y el mecanismo de redistribución por una serie de varios imanes electropermanentes montados sobre una estructura y movidos por una correa del mismo tipo aunque de ejes fijos en su posición, tratando de disminuir el número de grados de libertad mecánicos. Sin embargo esta opción también fue descartada por seguir necesitando la modificación de las patas.

4.2. Segundo diseño

Viendo que aportar al dispositivo de movimiento en pleno vuelo elevaba rápidamente el número de componentes y en consecuencia el peso, se decidió, volver al uso de los imanes electropermanentes. Debido a que a priori no había otra alternativa.

Tratando de hacer evolucionar el diseño del año anterior, se decidió, dotar de movilidad completamente independiente a los imanes electropermanentes. Esta solución fue adoptada por el equipo ganador de la pasada edición del Challenge [16]. Para ello se pensó en encajar los imanes en un soporte esférico que irían encajados en dos casquetes semiesféricos. De esta manera el soporte con el imán se amoldará completamente y en todo momento a la superficie plana del objeto.

Este segundo diseño estaba basado también en el OpenGrab EPM V3 R5C de NicaDrone (Figura 1 – 9). Recordamos, que en las especificaciones este imán electropermanente tiene un peso de 65 gramos con una fuerza de cogida mínima de 200 N y una fuerza típica de 300 N, que convertido a kilogramo-fuerza resulta una fuerza de 20,3943 Kgf y 30,5915 Kgf⁷, respectivamente.

A priori, más que suficiente para transportar todos los bloques del mecanismo con un factor de seguridad (λ) de 13,59 y 20,39. No obstante, si multiplicamos los valores de fuerza por el factor de atenuación debido al espesor (φ_6), nos quedan 5,3 Kgf y 8 Kgf, lo que a priori sigue siendo suficiente pero el margen es mucho más estrecho.

Por este motivo, se decidió usar 3 imanes electropermanentes a la vez. Este hecho, aumentaría el margen de seguridad a entre 10 ó 16, es decir que aportaría una fuerza de sujeción 10 ó 16 veces superior a la necesaria.

⁷ Se ha tomado como aceleración de la gravedad: $9,80665 \text{ m/s}^2$ para el cálculo de la fuerza de sujeción del imán electropermanente.

Además daría al sistema de robustez en cuanto al fallo de uno de los imanes, por lo que el bloque no debería caerse si uno de los dispositivos fallase. En la siguiente imagen se muestra el soporte esférico que alojaría los imanes junto con su vista explosionada.

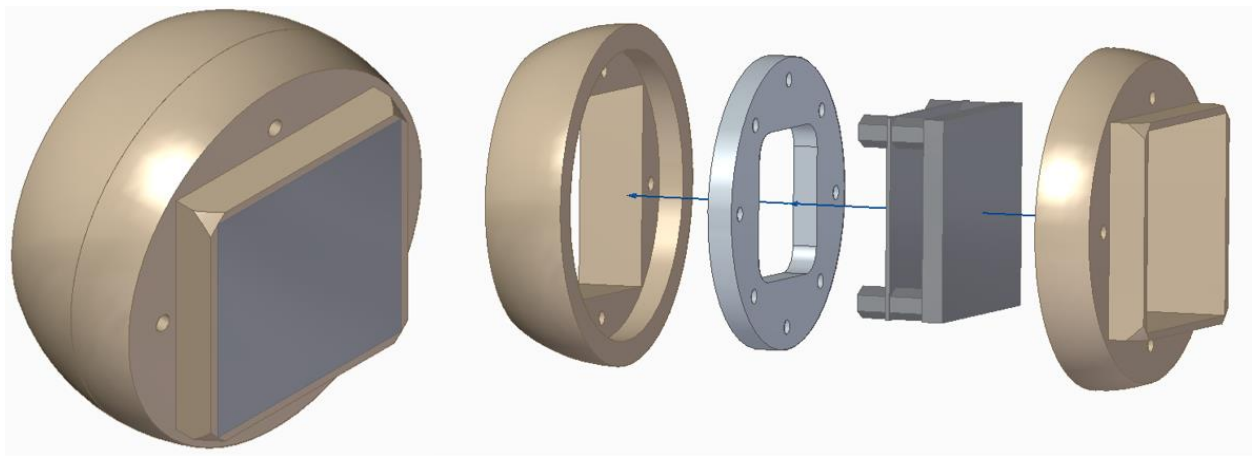


Figura 4 - 3. Soporte esférico.

La disposición pensada fue posicionar los imanes longitudinalmente con respecto al bloque, como se puede ver en la siguiente imagen.

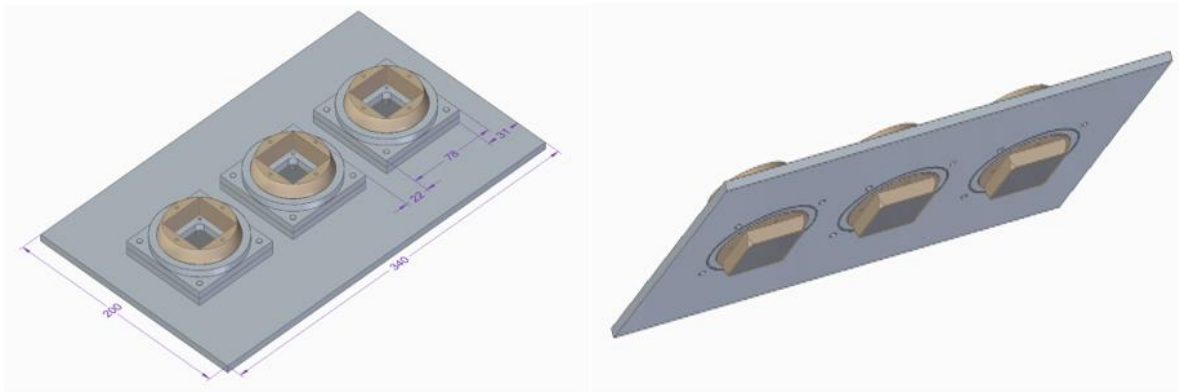


Figura 4 - 4. Vista general del segundo diseño.

En cuanto al peso del sistema, los 3 imanes electropermanentes tienen un peso conjunto de 195 gramos, por otro lado los casquetes y el soporte esférico pueden construirse con plástico PLA usando un bajo porcentaje de relleno, por lo que el peso sería relativamente reducido. Finalmente la plancha donde irían sujetos los casquetes, sería de fibra de carbono. En dicha placa también irían acoplados los sensores.

En cuanto a los sensores, se pensó en usar una red de pequeños sensores láser para medir si la cogida ha sido efectiva. En concreto se pensó en dos pequeñas placas (20,5x18.0x3.0 mm; 1,4 gramos) basadas en los sensores VL6180X, con un rango entre 5 y 100 mm; y VL53L0X, con un rango entre 30 y 1000 mm, ambos con una precisión de 1 mm. Con este rango de medición, y posicionando suficientes, también se podría medir la posición del UAV con respecto al bloque y con respecto a la pared, en el momento de la colocación.

Conclusiones

Llegados a esta fase, el diseño estaba listo para la siguiente fase: comenzar a fabricar y a depurar los componentes buscando minimizar el peso y mejorar el rendimiento. Sin embargo, la amarga experiencia con el uso de los imanes electropermanentes en la pasada edición, motivó el estudio de otras opciones.

4.3. Tercer diseño

Esta situación nos dejó en un nuevo callejón sin salida. Buscando, de nuevo, una alternativa basada en imanes permanentes encontramos en internet un video [17] en el que se construía un imán conmutable para agarrar piezas metálicas construido con imanes permanentes de neodimio.

El principio de funcionamiento es simple, se usan una serie de pares de imanes para crear cierres magnéticos distribuidos con caras alternas según un patrón circular de manera que el giro de una de las partes del mecanismo, en el que están alojados la mitad de los imanes, cambie la posición de éstos y haga que los cierres magnético cambien su flujo interno a uno externo, consiguiendo así la fuerza de sujeción. A partir de este momento, se comenzó a investigar sobre el principio físico descrito, encontrando que estaba basado en el cierre magnético, explicado en la sección 1.1.1. **Imán electropermanente.**

Ante esta nueva visión de poder crear un dispositivo a medida, decidimos dirigir el proyecto a confeccionar un dispositivo de cogida basado en esta construcción, y de creación y diseño propio. Dado que en teoría se pueden crear para cualquier fuerza de sujeción, se decidió crear uno con una fuerza de sujeción mucho mayor, que evitase cualquier tipo de contratiempo.

Con la fuerza de sujeción en mente, se optó por usar 6 pares de imanes ya que resulta natural usar este número cuando se utiliza la geometría circular. Por otro lado, se buscaron los imanes más fuertes que pudieran encajar en un hexágono de unos 5 cm de lado; esta medida se usó como estimación inicial para este diseño ya que con ella queda un círculo de 10 cm de diámetro, lo que supone tener un margen de 5 cm a cada lado a la hora de posicionar el UAV sobre los bloques. Es decir, un margen suficiente y asumible por los sistemas de posicionamiento.

Los imanes elegidos para este diseño serían unos cilindros de 10 mm de diámetro por 20 mm de alto, con una fuerza de atracción máxima de 4,4 kgf y un peso de 12 gramos. Los datos de concernientes a la fuerza de sujeción de este imán son mostrados en la tabla 4.

Como se puede ver en la tabla 4, la fuerza de sujeción de estos imanes para una placa de un espesor de 0,3mm se reduce a 1,15 kgf, lo que en total serían 6,8 kgf.

Dada la gran reducción que sufren, se pensó en crear un circuito magnético con las menores pérdidas posibles. Con esto en mente surgió un diseño con unas dimensiones de 36 mm de altura por 75 mm de diámetro, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

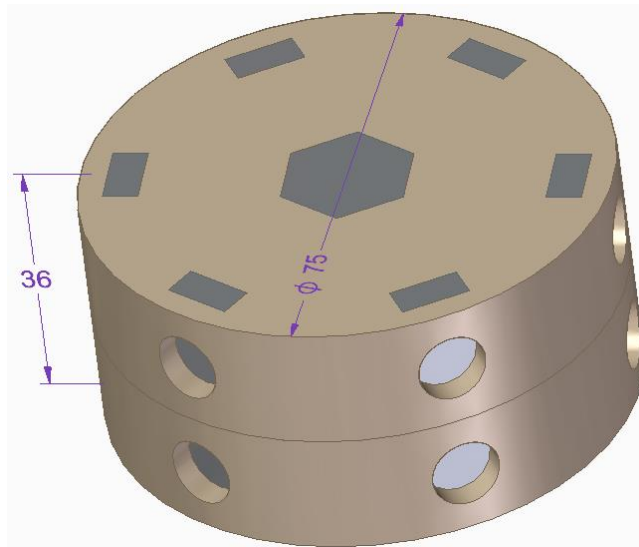


Figura 4 - 5. Vista general del tercer diseño.

En las siguientes imágenes se muestran con detalle las posiciones de los imanes en la configuración de agarre y en la configuración de no agarre, donde los colores rojo y azul representan el polo norte y sur de los imanes.. También se muestran las dimensiones de las secciones de placa de acero usadas para crear el circuito magnético de cierre magnético que son de 5 mm de espesor, por 10 mm de ancho por 18 de alto. Estas medidas tiene su justificación.

En cuanto al espesor de dichas placas, como se puede ver en la tabla 4, los imanes usados para este diseño no sufren de disminución de su fuerza de atracción para un grosor de placa de 2mm con una distancia cero. Eso quiere decir que la totalidad del flujo que crea el imán atraviesa la placa de espesor 2mm. Dado que se van a usar 2 imanes por circuito magnético, se pensó en usar una placa con un grosor de 4m. Sin embargo dado que el flujo magnético es dependiente de la forma de la geometría del circuito magnético y a las posibles pérdidas dimensionales, se decidió aumentar su grosor a 5 mm. Por otro lado, uno de los proveedores más usados por el grupo disponía de varillas de hierro dulce con ese mismo espesor⁸.

El alto y el ancho de las secciones era debido al propio diámetro de los imanes y a dar un espesor mínimo de 1,5mm de plástico PLA para alojar los imanes.

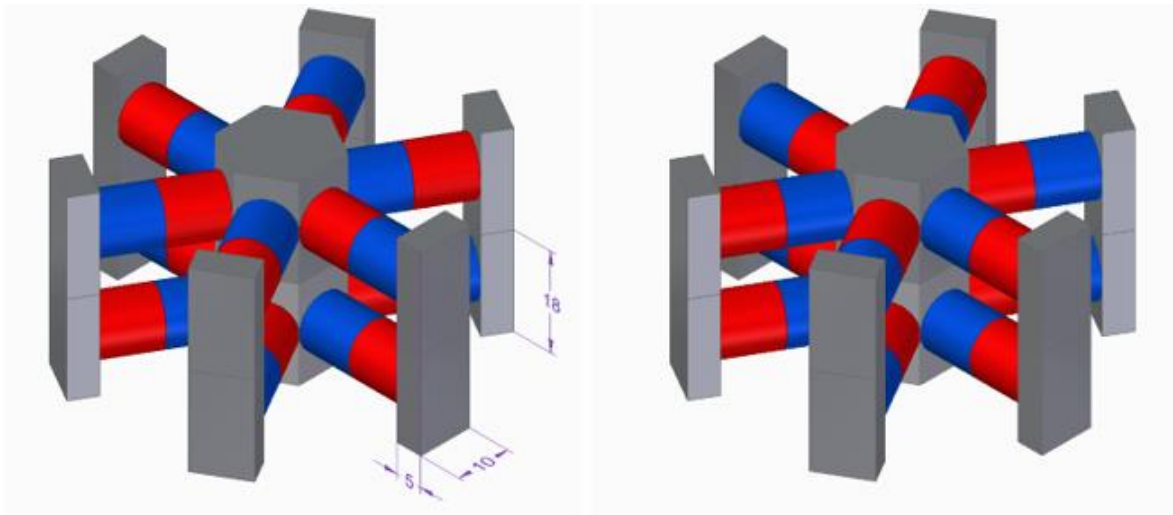


Figura 4 - 6. Posiciones de agarre y no agarre del tercer diseño.

En la siguiente imagen se muestran los prismas hexagonales centrales.

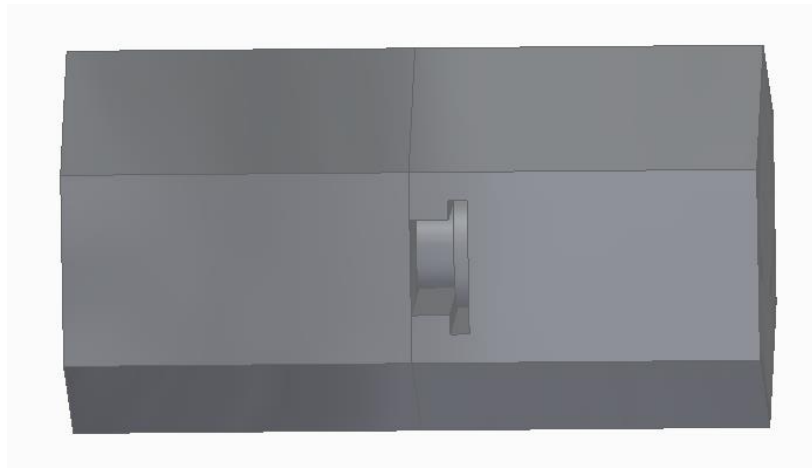


Figura 4 - 7. Prismas hexagonales centrales del tercer diseño.

La forma de estos elementos centrales se pensó para que el contacto de los imanes fuera directo y a la vez se minimizaba el espacio del sistema completo. Para mantener la consistencia del sistema, se pensó en tornearse un pequeño eje con chaveta incluida, de manera que permitiera el giro pero no el desplazamiento longitudinal. En el otro prisma se crearía la abertura para alojar el eje, tal como se muestra en la imagen anterior.

Fijándonos en el peso del sistema, el programa Solid Edge ST9, con el cual se diseñó nos daba un peso de 435

⁸ <https://es.rs-online.com/web/p/angulos-de-acero/0770642/>

gramos para el conjunto, sin incluir ningún sistema de sujeción, lo cual resultaba un peso excesivo.

Conclusiones

El elevado peso aproximado del sistema y la dificultad de construcción de los primas hexagonales motivó un nuevo diseño más simple y ligero. Por otro lado, no había experiencia directa en el uso de imanes permanentes conmutables, esto motivó la exploración de una nueva alternativa.

4.4. Cuarto diseño

Una reducción del peso implicaba necesariamente una reducción de la fuerza de sujeción. Por este motivo se decidió investigar físicamente la fuerza mínima necesaria para aguantar los bloques, construyendo un dispositivo con el fin de probarlo físicamente y sacar resultados directos.

Este diseño se realizó con 4 imanes, de los mismos pensados para el diseño anterior. El motivo de usar 2 pares es probar la situación más simple que soportaría a los bloques. La situación más simple hubiera sido usar un par, sin embargo, si a esos 4,4 kgf de fuerza de sujeción máxima de un par de imanes le aplicamos el coeficiente de reducción debido al espesor de la chapa, nos quedan 1,15⁹ kgf. Insuficiente para levantar el bloque de 1,5 kgf. Con los dos pares nos queda una fuerza teórica de 2,3 kgf, con un margen de 0,8 kgf para levantar el bloque más pesado.

Por otro lado, se trató de reducir la cantidad de PLA usado vaciando las secciones que no tenían ninguna función. Por la parte exterior se mantuvo una corona circular de plástico cuya función era la de proteger las secciones que debían hacer contacto entre sí, para que no se llenasen de suciedad.

También se le añadió una base con agujeros para poder atornillarla a una superficie y un agujero para poder insertar una barilla y accionar fácilmente el dispositivo en caso de que no fuera sencillo realizar el giro con la mano, ya que a priori, no se tenía información del par necesario para hacerlo funcionar.

En la siguiente imagen puede verse el diseño hecho por ordenador.

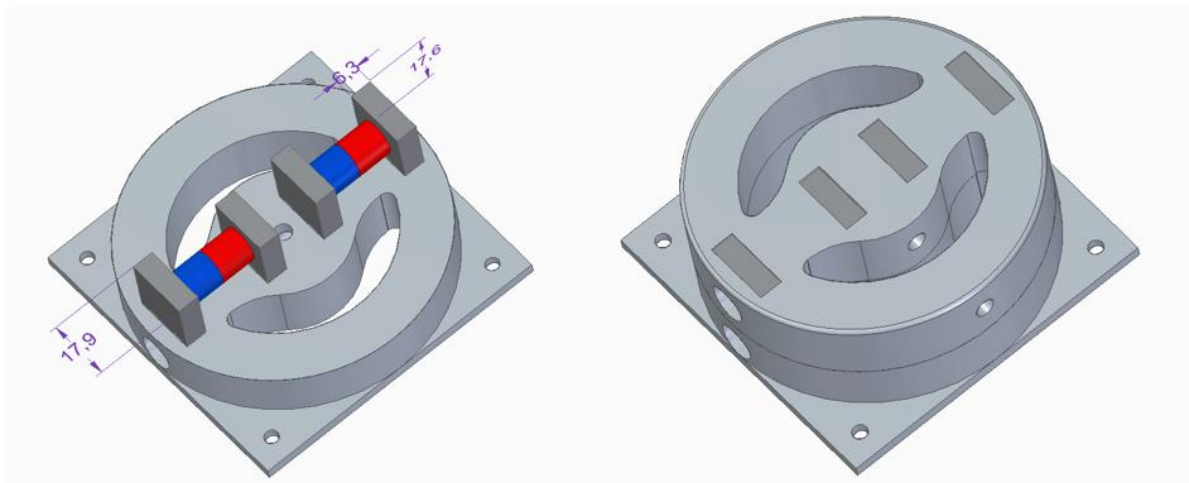


Figura 4 - 8. Vista general del cuarto diseño.

Como eje del dispositivo se diseñó un pequeño cilindro que sobresalía a modo de apéndice de la mitad superior del dispositivo, sin embargo, resultaba bastante endeble, por lo que acabó rompiéndose y se sustituyó por una varilla roscada que encajaba en el espacio del anterior eje.

Este diseño dio lugar al dispositivo mostrado en la figura 4 – 9. Debo comentar que en la imagen aparece un apéndice hexagonal adherido al diseño arriba mostrado. La función de ese apéndice, hecho a medida y con un porcentaje de relleno del 10%, es la de encajar un vaso hexagonal para medir el par necesario para accionar el

⁹ El valor del factor ha sido de 0,2613, y el resultado se ha redondeado a la décima.

dispositivo. Esta medición fue hecha con un destornillador dinamométrico con un rango de 0 a 20 Nm y con una precisión de 0,01 Nm. El dispositivo es mostrado en la siguiente figura 4 - 10.

Como resultado de la medición se obtuvo un par máximo de accionamiento del dispositivo de 1,72 Nm, lo que resulta: 17,54 kgf·cm. Esto resulta un valor bastante grande, considerando que el valor máximo alcanzado por un servomotor¹⁰ para usar con Arduino da 0,268 Nm (2,74 kgf·cm). Con lo que se tendría que usar una reductora para multiplicar el par, un dispositivo de accionamiento con una capacidad mayor o una combinación de ambas opciones para accionar este dispositivo. Otra opción viable, sería reducir la fuerza de rozamiento entre las mitades de este dispositivos mediante el uso de lubricantes o rodamientos.



Figura 4 - 9. Cuarto diseño fabricado.



Figura 4 - 10. Destornillador dinamométrico.

En cuanto a la sujeción de los bloques, se observó que desde un primer momento era capaz de sujetar los bloques rojo y verdes, pero el azul, de 1,5kg se le escapaba, esto era debido a un error en las mediciones. La creación de cualquier objeto lleva, de manera inevitable, ciertos errores de precisión. Esto mismo ocurrió en el corte de las secciones de material conductor. En un primer momento las secciones encajaron haciendo coincidir una de sus caras con el plano de contacto de ambas mitades del dispositivo, esto hizo que las secciones sobresalieran o no llegaran a alinearse con el plano de la base (zona de contacto con los bloques). Después de limar las secciones y lijar la base del dispositivo (se puede apreciar en la figura 4 – 10), estos errores se corrigieron y el rendimiento del dispositivo aumentó enormemente siendo capaz de sostener el bloque de 1,5 kg y mejorando la fuerza de sujeción en los otros bloque.

¹⁰ <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/123f/0900766b8123f8d7.pdf>



Figura 4 - 11. Base del cuarto diseño.

Las pruebas manuales realizadas fueron las siguientes:

- El bloque rojo pudo ser cogido y movido en cualquier ángulo. Su cogida era resistente a vaivenes suaves aunque se llegaba a desprender con sacudidas de mayor intensidad, con respecto a la excentricidad de la sujeción, el dispositivo fue capaz de sostenerlo aun cuando la cogida se realizó a 10 cm del centro.
- Con el bloque verde la fuerza de sujeción mejoró y también pudo ser sustentado aunque no era capaz de mantenerse con una inclinación vertical y era mucho menos resistente a sacudidas. Lo mismo sucedió con la excentricidad, debido a que el dispositivo estaba más cerca de su límite la sujeción no se aseguró para distancias mayores a 5 cm.
- Para el bloque azul, el rendimiento fue como cabía esperar. Fue capaz de sostenerlo en posición horizontal pero no fue capaz de sostenerlo en posiciones inclinadas cercanas a los 30 grados y apenas tenía resistencia ante sacudidas. Con respecto a la excentricidad, apenas aguantó posiciones alejadas un par de centímetros.

Finalmente, mirando el comportamiento del sistema cuando se quiere cesar de aplicar fuerza de sujeción, la respuesta fue muy buena. Es decir, no se notaba ninguna mínima fuerza residual, la conmutabilidad del dispositivo era perfecta.

Con respecto al peso del dispositivo, el conjunto pesó 233 gramos. Este peso supone una reducción de casi la mitad del peso, no obstante se han usado un tercio de la fuerza de sujeción. Esta disonancia es achacada a que debido a los errores en el corte de las secciones metálicas se aumentó el volumen de metal en el dispositivo, lo que resultó en un peso bastante mayor del esperado.

Conclusiones

La respuesta del sistema se comportó como cabía esperar, se considera buena teniendo en cuenta el escaso margen de fuerza que se le ha dado.

El gran par, en relación con la capacidad de los servomotores habituales, necesario para accionar el dispositivo hace necesario la creación de dispositivos que integren reductoras o rodamientos para minimizar este aspecto.

El peso seguía siendo un aspecto a mejorar. Considerando el peso del dispositivo sin tener en cuenta el accionamiento, debemos considerar una minimización notable del peso. Eso implica necesariamente reducir el volumen de metal.

En cuanto al comportamiento natural del dispositivo, se observó que el aparto tendía de manera natural a la posición en la que el flujo magnético de los imanes circulaba a través de los elementos conductores, es decir, a la posición donde no proporcionaba fuerza de sujeción.

4.5. Quinto diseño

Llegados a este punto se consideraron todos los caminos de mejor marcados por el diseño anterior, tratando además de encontrar el dispositivo con el menor peso posible. Buscando una nueva alternativa llegamos un nuevo video basado en el cierre magnético pero con un enfoque totalmente distinto, en el que la masa de los elementos conductores de campo era mucho más reducida [18]

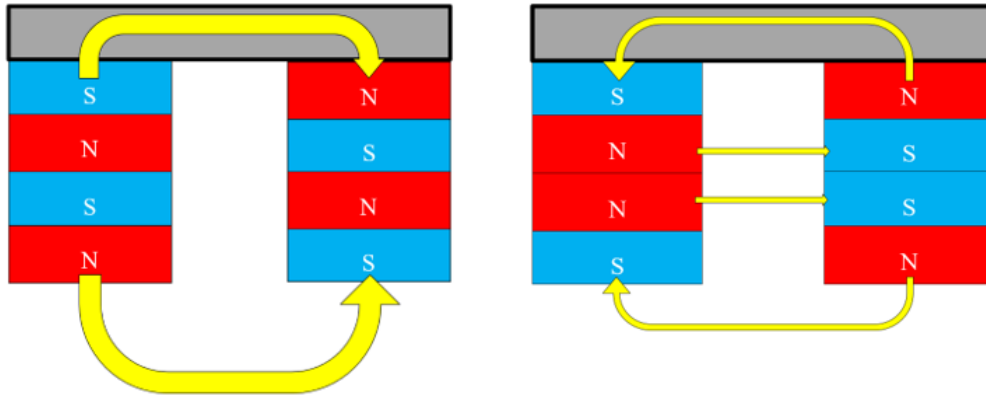


Figura 4 - 12. Nuevo enfoque del cierre magnético.

Como se ha mencionado, esta arquitectura está basada en el cierre magnético y funciona de manera similar a las versiones anteriores, sin embargo, tratando de usar el menor material ferromagnético posible se ha cambiado el material ferromagnético conductor de versiones anteriores por la propia superficie a atraer. Esto trae consecuencias en cuanto al funcionamiento del imán.

A la izquierda de la imagen, se muestra la posición natural de este tipo de imanes. Esta sería la posición en la que el imán proporciona una fuerza de sujeción mayor debido a que cada columna se comporta como un único imán, esto provoca que el flujo magnético (en amarillo) se sume y circule únicamente a través de la placa y del aire formando una única malla. Si en esta misma posición, el dispositivo se acerca a un objeto metálico, ese objeto metálico es atraído para formar parte del circuito magnético y adherirse a la parte inferior ya que este elemento, al tener una permeabilidad relativa mayor que el aire, facilita la circulación del campo magnético en su interior.

A la derecha de la imagen, se muestra la posición contraria, la menos natural ya que las caras iguales se repelen. El motivo para que, en esta posición del dispositivo, la fuerza de sujeción sea menor es que el flujo magnético se divide en dos mallas (donde además circulan en sentidos contrarios) y por tanto, un menor flujo magnético implica menor fuerza de sujeción. Por otro lado, como cada par de imanes tiene enfrentadas sus caras iguales Sin embargo, esta arquitectura implica que la fuerza de sujeción nunca se anule. Si tuviéramos colocada una pieza de material ferromagnético en la figura de la derecha, para conseguir que la pieza se libere de la sujeción del dispositivo sería necesario que el peso de la pieza fuera mayor que la fuerza parásita creada por el dispositivo.

Con esta arquitectura en mente se creó el diseño mostrado en la figura 4 – 13 y en la figura 4 – 14.

En la primera de las figuras recientemente mencionadas, se aprecia la vista exterior del sistema tanto en su posición de trabajo (parte izquierda), como volteada (parte derecha) donde se ven algunos detalles.

En la figura 4 – 14 se muestra la vista interior del dispositivo, donde los elementos amarillos son imanes en forma de disco con un diámetro de 15 mm y 3 mm de alto, con una fuerza de atracción de 3,2 kgf y un peso de 4 gramos cada uno. Están colocados alternativamente, como en los diseños anteriores para conseguir también, que mediante el giro cambien las características magnéticas del sistema.

En cuanto a las dimensiones, el elemento inferior tiene un diámetro máximo de 60 mm y hay una distancia de 29 mm entre la base y el final del tornillo.

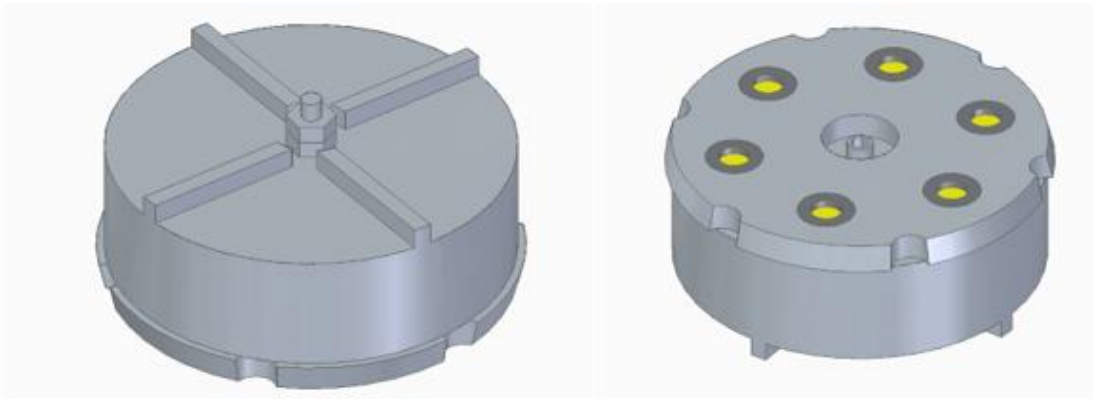


Figura 4 - 13. Vista general del quinto diseño.

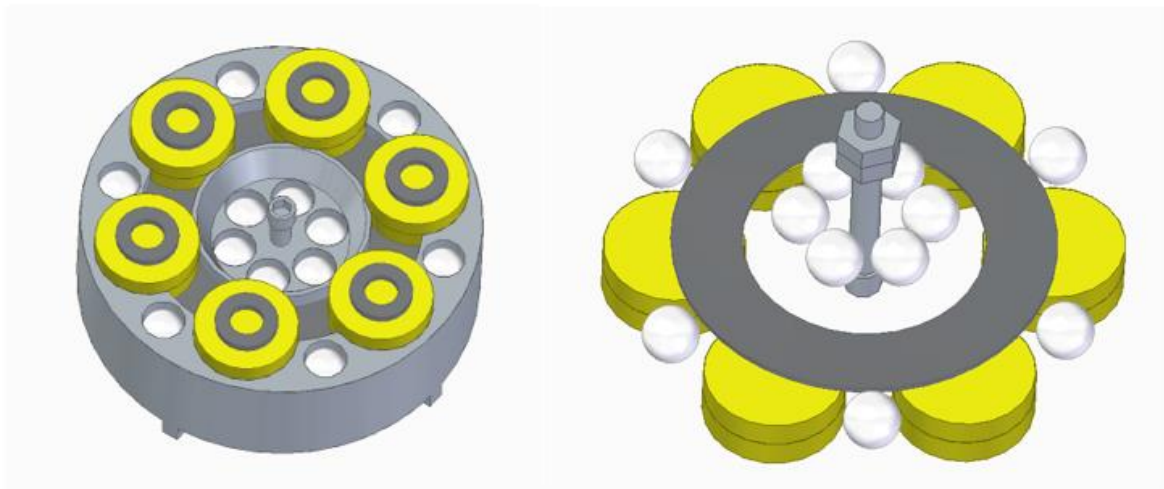


Figura 4 - 14. Vista interior del quinto diseño.

Pasamos a comentar los elementos que lo componen.

En primer lugar, comentaremos la base. Es el elemento que puede verse con claridad en la parte derecha de la figura 4 – 13. Esta pieza encaja con la pieza superior a través de un eje cónico y en ella van alojados seis imanes posicionados con las caras visibles alternas, es decir, norte-sur-norte-etc. Son los imanes destinados a atraer a los objetos. Dado el pequeño tamaño de los imanes, si se hubieran pegado directamente a una pared cilíndrica la sujeción de estos con el pegamento no hubiera sido suficiente. Por tanto se optó por encajar los imanes en unos huecos. Para evitar la pérdida de rendimiento debido a la separación se han usado arandelas de acero con bajo porcentaje de carbono para conducir el campo magnético hasta la superficie de contacto. Su forma exterior es cónica con una serie de 6 huecos, esta forma tiene la función de fija la base para evitar un movimiento de giro y un movimiento de salida, de manera que sólo es posible desmontar la base desencajándola.

En la siguiente figura 4 – 16 puede verse el soporte sobre el cual va montada la base.

En segundo lugar, comentaremos la parte superior. Esta pieza es la de una geometría más compleja. En ella, además de encajar el eje cónico de la figura base, están alojadas 12 bolas de plástico que funcionan a modo de rodamiento minimizando el rozamiento, 6 imanes iguales a los de la pieza base y una arandela que conecta todos los imanes de esta pieza para formar el circuito magnético. También tiene unos bloques en forma de cruz en su cara superior, cuya función es la de acoplar una pieza que sirva de puente estructural entre el dispositivo y el accionador

Para dar una mejor idea de la geometría a continuación se muestran dos vistas explosionadas del conjunto, la pieza de acople con el accionador no aparece en estas vistas.

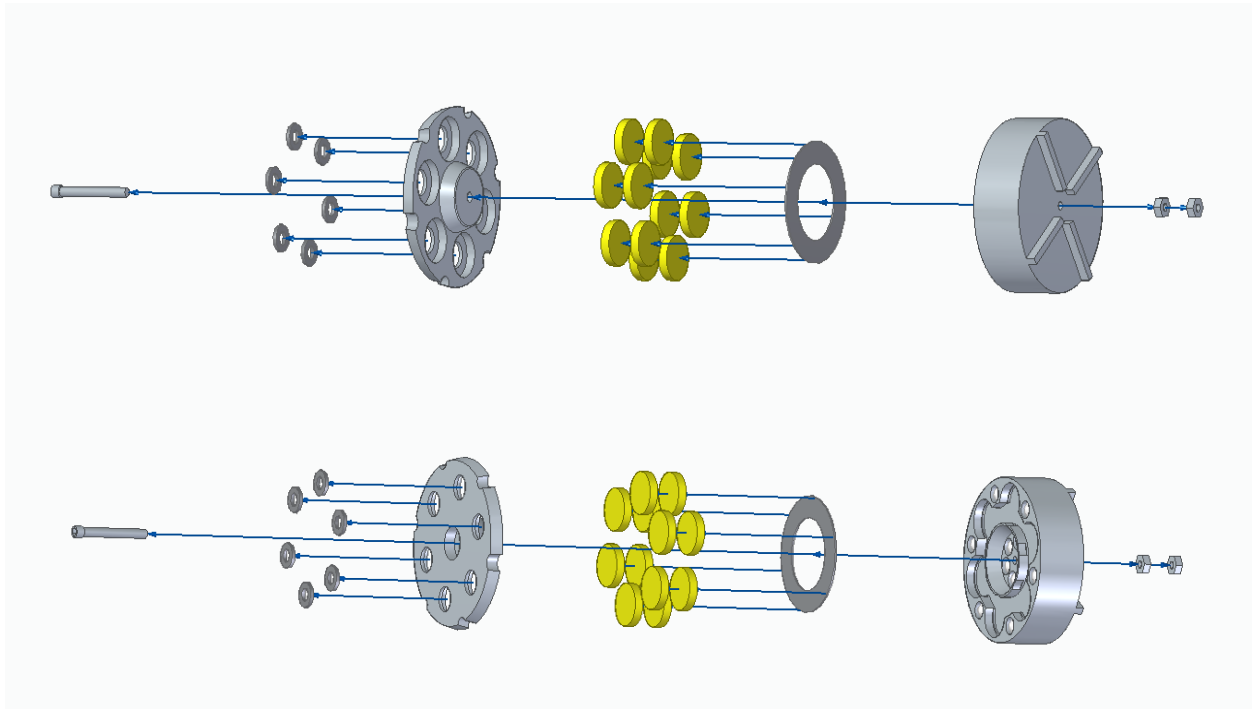


Figura 4 - 15. Vistas explosionadas del quinto diseño.

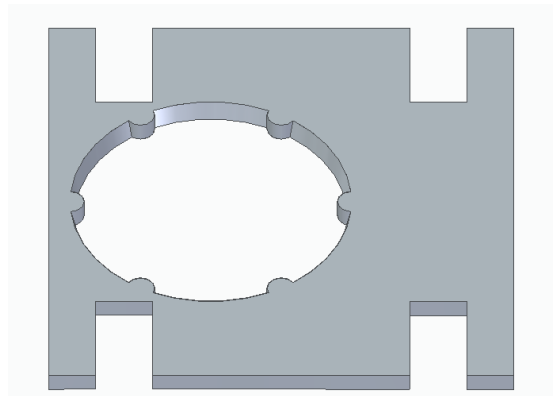


Figura 4 - 16. Soporte del quinto dispositivo.

Pasamos a comentar las características físicas de este dispositivo.

Dado que se han usado 6 pares de imanes de 3,2 kgf, la fuerza máxima de sujeción es de 19,2 kgf. Si aplicamos el coeficiente de reducción de la fuerza de sujeción propio de estos imanes para este espesor (0,2963), se estima que la fuerza de sujeción real será de 5,69 kgf.

Para compensar el par necesario para accionar estos imanes, se han tratado de distribuir a una distancia menor. Esto salta a la vista, dado que el diámetro de la pieza superior es de 58mm. Por otro lado se ha dotado al sistema de rodamientos plásticos que minimizan la fuerza de rozamiento interna.

Como mejor alternativa de diseño sobre el papel, pasamos a la siguiente fase y aplicamos un software de elementos finitos para analizar el comportamiento del dispositivo antes de construirlo.

Justificación y conclusiones

Una vez introducidas las propiedades magnéticas de los elementos en el programa de elementos finitos aplicados al magnetismo, se pasó a realizar un análisis magnetostático del flujo de la fuerza que sería capaz de crear el dispositivo en las dos posiciones más relevantes. Para todos los análisis se ha usado el bloque rojo (20x20x30 cm) ya que sus dimensiones son suficientemente grandes para alojar las regiones de interés, no se han hecho análisis con los otros bloques pues el cambio de dimensiones no afecta a estas regiones.

Estudio magnético en la posición de cogida

En la siguiente imagen puede verse la distribución, magnitud y dirección del campo magnético creado por el dispositivo en una sección que abarca 2 pares de imanes. Puede apreciarse la variación de la dirección de los vectores en sentido horario, lo que indica que la hipótesis de circulación del campo magnético era correcta.

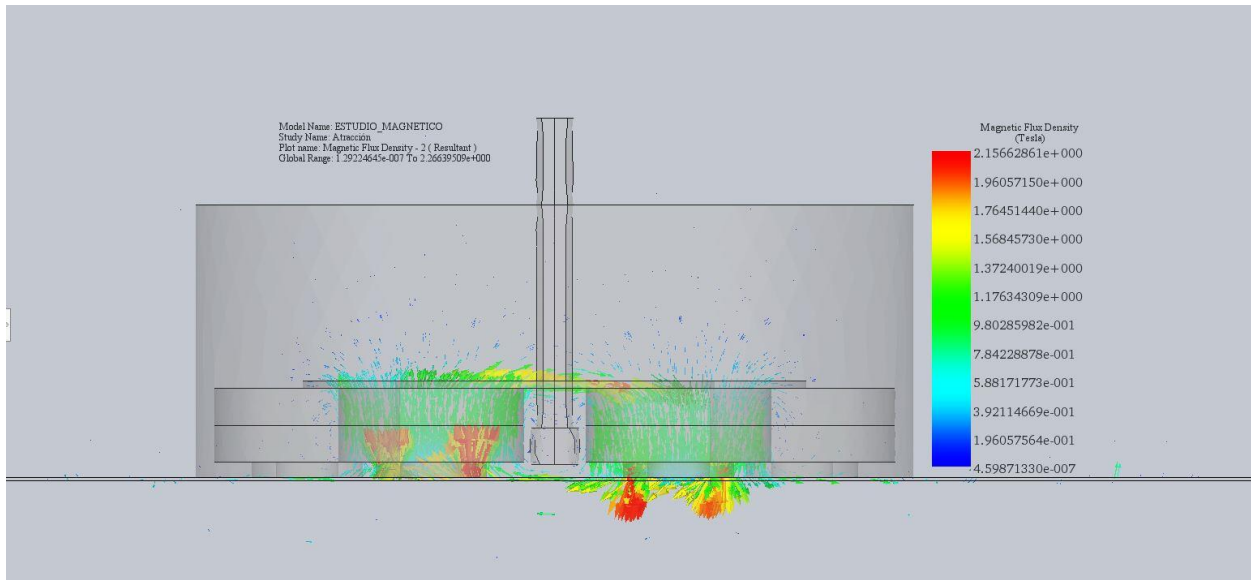


Figura 4 - 17. Flujo magnético en la posición de agarre del quinto diseño.

También puede apreciarse cómo se concentra el flujo en las arandelas grower modificadas y en la arandela grande de fabricación propia que conecta todos los imanes de la pieza superior. Esta arandela, al conducir el campo magnético evita que este pase mucho más allá de ella por lo que el efecto del campo magnético, tanto en la posición de agarre como de liberación, es pequeño más allá de la arandela.

En la figura siguiente se puede apreciar con mayor detalle el flujo magnético en esta sección.

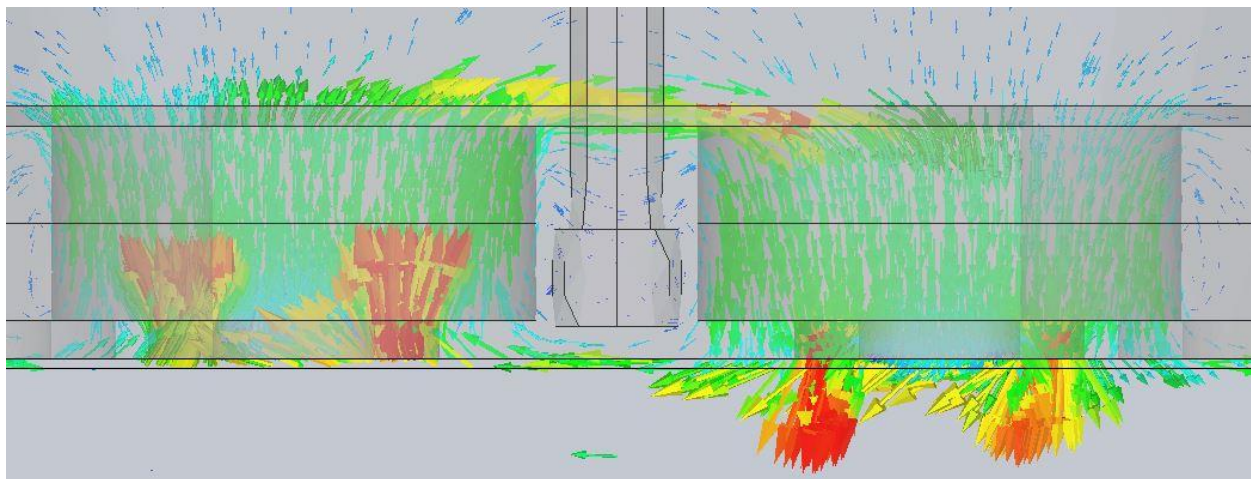


Figura 4 - 18. Detalle de conducción del campo magnético.

Por otro lado, en las siguientes imágenes pueden apreciarse la distribución de fuerzas creada por el dispositivo sobre la placa de material ferromagnético del bloque más pequeño. Como se puede apreciar la variación en los extremos del modelo es mínima, lo que justifica el análisis sólo en este bloque. El bloque corresponde al área coloreada (sobre todo de color azul marino).

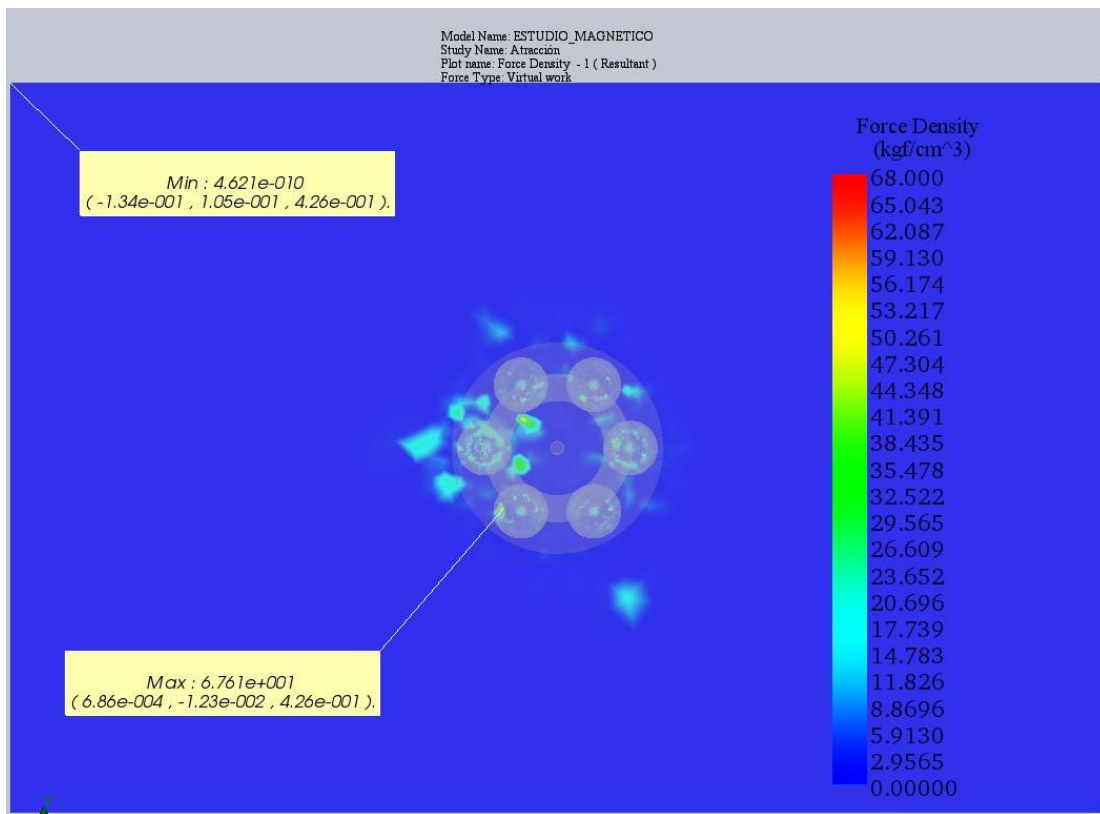


Figura 4 - 19. Distribución de fuerzas en la cara de contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de agarre.

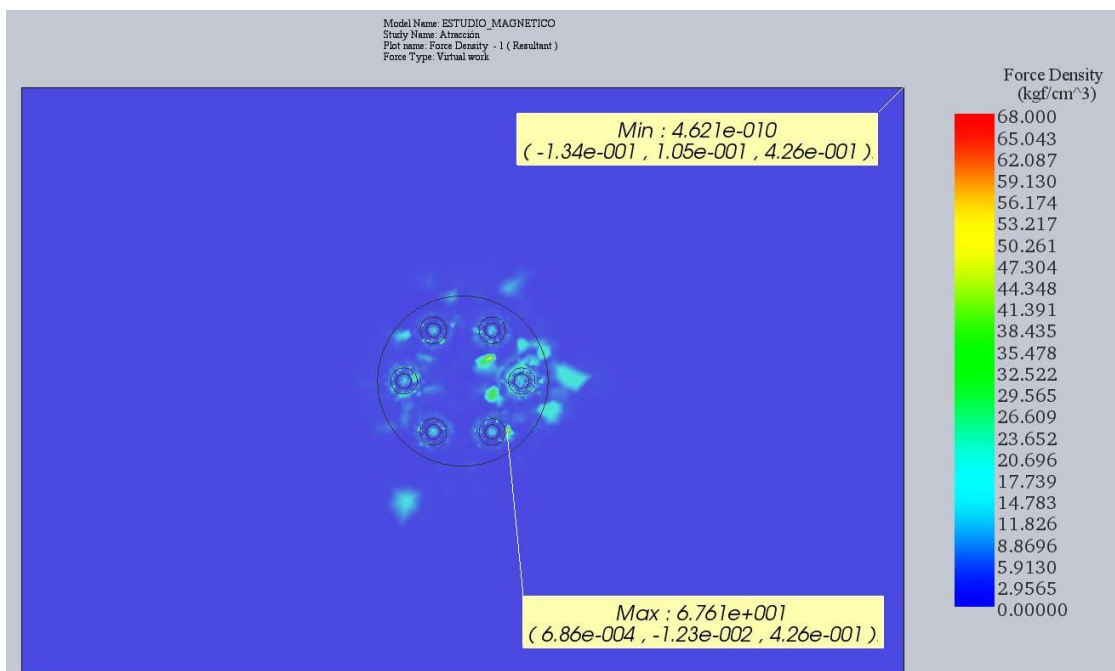


Figura 4 - 20. Distribución de fuerzas en la cara opuesta al contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de agarre.

Estudio magnético en la posición de liberación

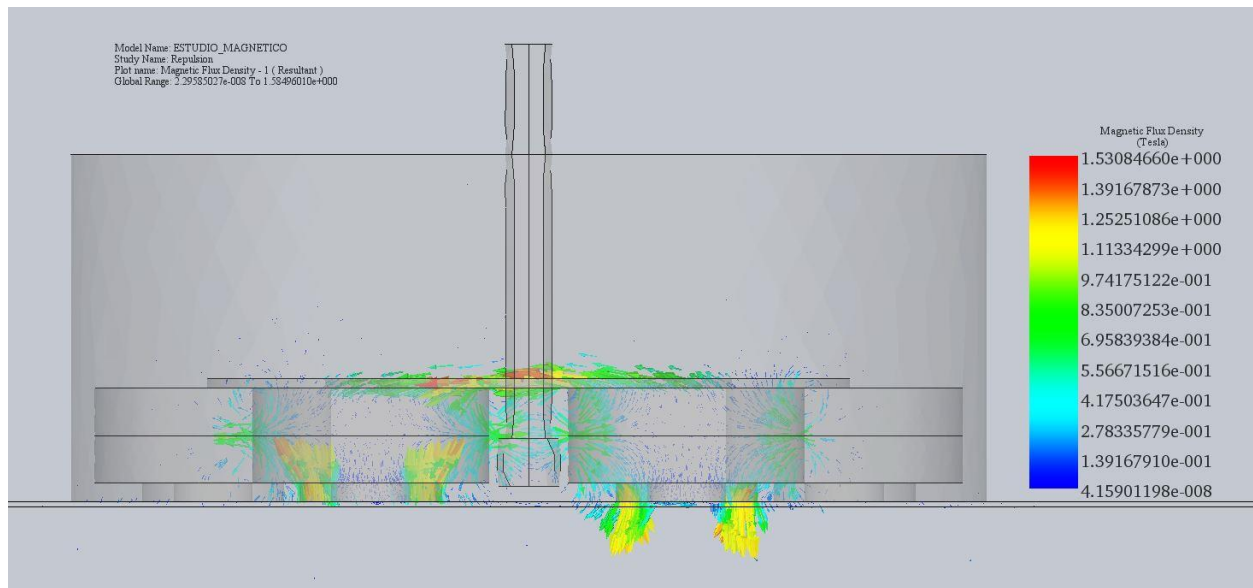


Figura 4 - 21. Flujo magnético del dispositivo en la posición de liberación.

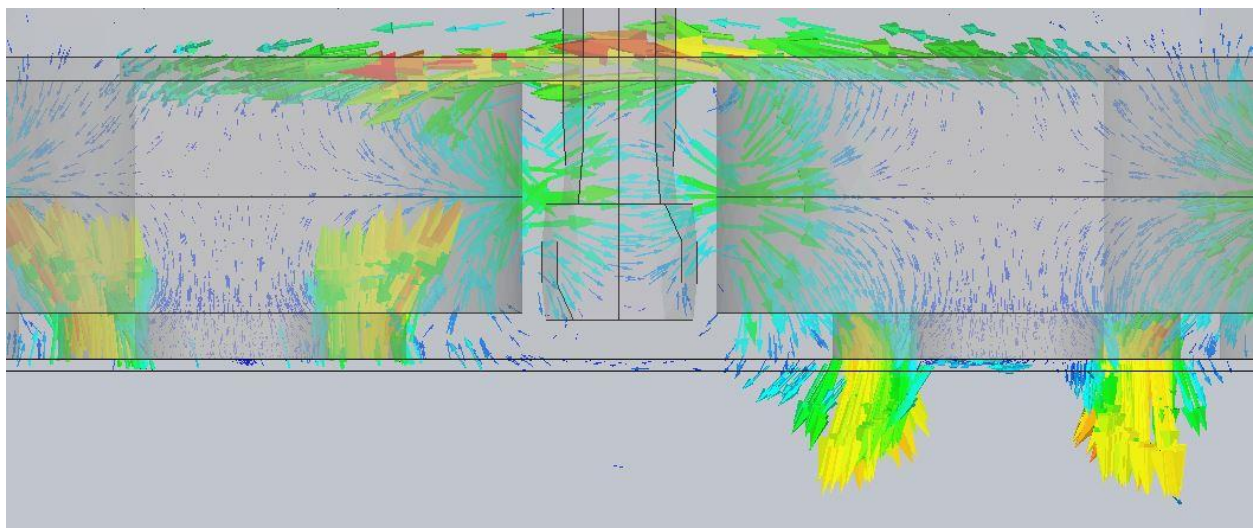


Figura 4 - 22. Detalle del flujo magnético del dispositivo en la posición de liberación.

Como se deduce de las imágenes anteriores, las hipótesis concernientes a la conducción en esta posición son válidas. Si nos fijamos en los valores numéricos de la escala y los comparamos con los valores mostrados en la figura 4 – 17, se puede apreciar cómo han disminuido la concentración del campo magnético en las arandelas.

Por otro lado se pueden apreciar mallas de circulación magnética de diferente sentido.

En las siguientes imágenes se muestra la distribución de fuerzas que tendrían lugar en el dispositivo con la posición de liberación con el bloque acoplado al dispositivo.

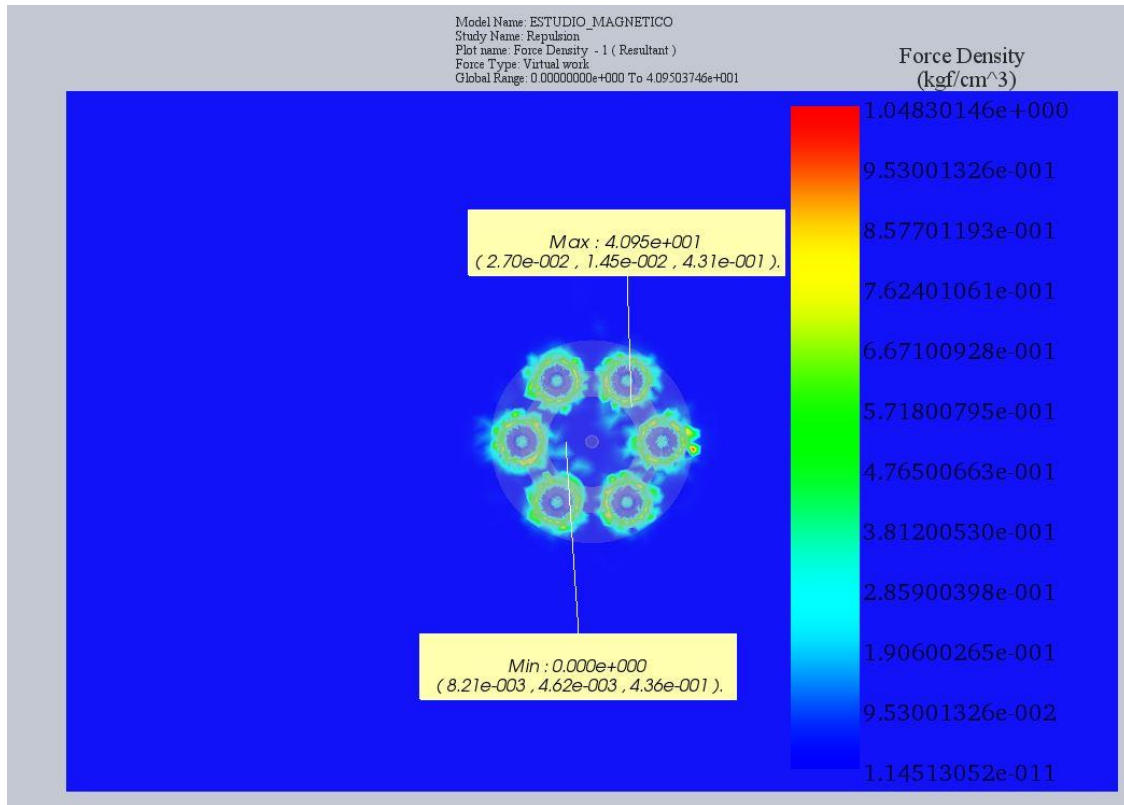


Figura 4 - 23. Figura 4 - 24. Distribución de fuerzas en la cara de contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de liberación.

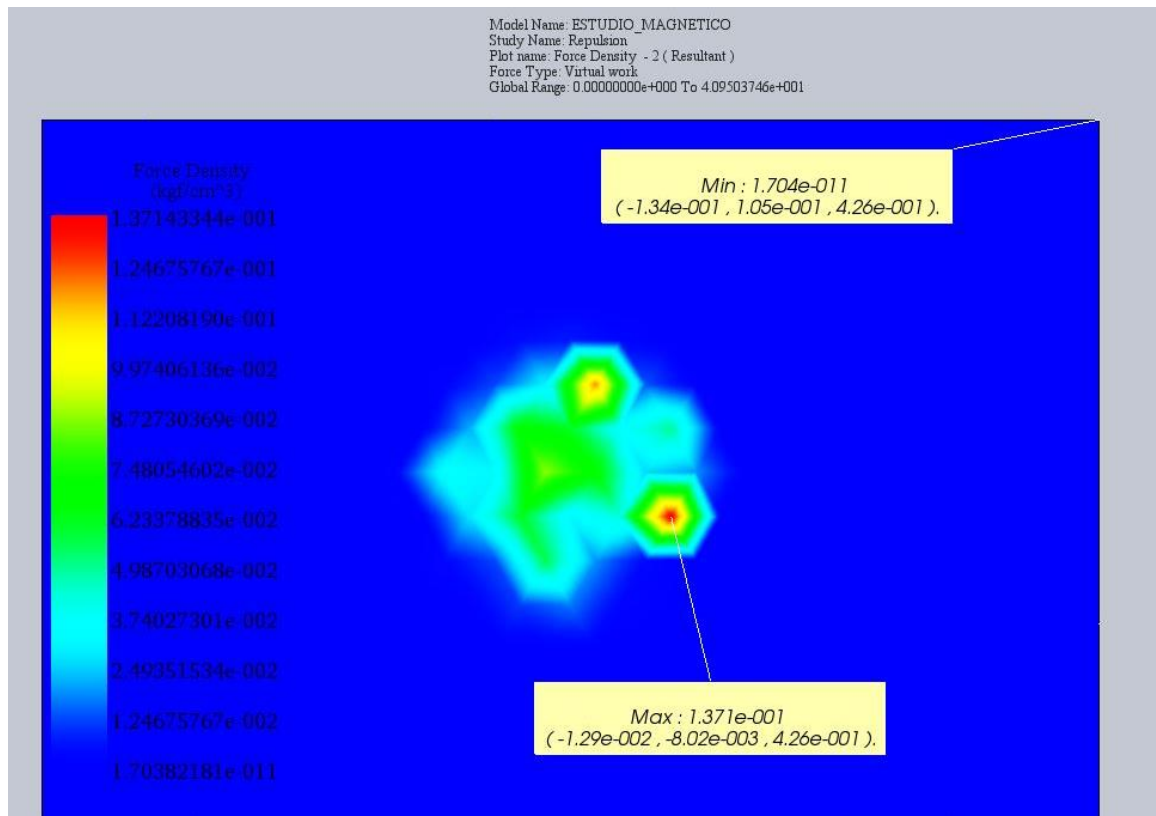


Figura 4 - 25. Figura 4 - 26. Distribución de fuerzas en la cara opuesta a la de contacto de la chapa de un bloque rojo en la posición de liberación.

Aunque los métodos basados en elementos finitos son una herramienta de análisis muy potente y precisa, no está exenta de errores. Estos métodos están basados en algoritmos que evalúan las ecuaciones diferenciales que rigen un determinado suceso en pequeños tramos, secciones y volúmenes, de manera que integrando la información que nos ofrecen cada uno de éstos elementos se realiza un análisis completo del suceso. Esta discretización lleva consigo un error ineludible, y del que depende en gran medida el resultado del análisis, el cual trata de minimizarse aumentando la precisión.

Por ejemplo, para los análisis de las fuerzas hechos anteriormente salta a la vista que dada la geometría del sistema (hexagonal formada por dos geometrías triangulares alternadas), la fuerza aplicada debe responder también a un patrón hexagonal o al menos triangular, sin embargo puede apreciarse que en algunos de los resultados esta geometría no es evidente.

4.6. Dispositivo final

Una vez validadas las hipótesis se pasó a construir el dispositivo, con el siguiente resultado.



Figura 4 - 27. Detalle de la base del dispositivo final.



Figura 4 - 28. Detalle del interior del dispositivo final.

En cuanto al peso, aunque se han usado 6 pares de imanes en lugar de los 2 usados para la versión anterior, este tipo de imanes permite un uso mucho menor de material metálico. Únicamente se han usado una arandela de 40,7 mm de diámetro exterior y 25,8 mm de diámetro interior, otras 6 pequeñas arandelas tipo grower aplanadas y un tornillo con dos tuercas para fijar el sistema. Por otro lado, el volumen total del dispositivo es menor que el de todos los demás. Todo esto ha resultado en un peso de 97.5 gramos, con lo que se ha conseguido una reducción muy significativa del peso

Debo comentar por último que la reducción de la fuerza de rozamiento, trae consigo un efecto de tendencia inestable en la posición de liberación del bloque. Es decir, en la posición en la que el flujo se divide, las caras iguales de los imanes están enfrentadas por lo que el sistema tiene tendencia a abandonar esta posición. Al haberse reducido la fuerza de rozamiento es necesario que esta tendencia sea compensada de algún modo. Esto se hará usando un servomotor potente¹¹ de hasta 40 kgf · cm, más que suficiente para accionar cualquiera de los

¹¹ <https://tienda.bricogeeek.com/servomotores/1322-servo-gigante-feetech-40kg-ft5335m-fb-con-feedback.html>

dispositivos mostrados en este proyecto. El motivo de no haberlo mencionado antes es que su venta no estaba disponible anteriormente.

Pasamos a comentar las pruebas manuales realizadas.

El bloque rojo se sujetaba con una fuerza más que suficiente para realizar con él cualquier maniobra. Sin embargo la fuerza residual de este dispositivo hacía que en ocasiones el bloque no se liberara por lo que sería necesario instalar algún elemento que ayudase en esta tarea. La excentricidad de la cogida fue solventada completamente por la fuerza de sujeción.

En cuanto al bloque verde, los resultados con este bloque fueron muy buenos. La fuerza de sujeción era suficiente para agarrar el bloque con seguridad en todo momento y en cuanto a su liberación, se realizó sin problemas. El efecto de la excentricidad fue bastante pequeño, prácticamente se consiguieron doblar los resultados obtenidos con la anterior construcción.

Para el bloque azul se consiguió un agarre fuerte a la vez que también se consiguieron mejorar los efectos de la excentricidad.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES FINALES

En el este capítulo se resumirán las principales conclusiones originadas como consecuencia de este proyecto, así como las posibles líneas de mejora e investigación futuras.

Conclusiones

Las restricciones impuestas por la organización del concurso y los problemas que pueden afectar a los diseños han motivado la búsqueda de diferentes alternativas que han reportado diseños con resultados satisfactorios. La base de estos diseños es válida para ser aplicada en la creación de nuevos diseños con distintas utilidades como pueden ser la recogida de distintos objetos ferromagnéticos o de mayores y menores pesos.

Mencionar que de cara a la competición se ha procurado dotar a los diseños de cierta robustez ante las desavenencias. Sin embargo, su validez está ligada inevitablemente a las condiciones del concurso. El desarrollo de nuevas ideas es la única opción para superar estas situaciones.

Líneas de mejora

Conforme se han ido exponiendo los distintos diseños se han ido dando indicaciones de mejora, por lo que en esta sección no se hablarán de las mejoras específicas que cada uno de los diseños puede sufrir, en su lugar, se exponen resumidamente las mejoras más importantes.

Una línea de mejora clara, en todo elemento usado en vehículos aéreos es el peso, los diseños de este proyecto pueden ser mejorados en este aspecto utilizando materiales más ligeros, rígidos o de fabricación específica.

De todos los diseños, comentaremos estas líneas en el diseño final por ser el que mejor rendimiento ha mostrado:

- Se debe estudiar el efectuar cambios en el circuito magnético de cara a minimizar el efecto de la fuerza residual.
- Se puede estudiar el uso de varios de estos dispositivos de cara a optimizar el rendimiento en el concurso.
- -Se puede estudiar el efecto de la fuerza de rozamiento de cara a que afecte positivamente a la estabilidad del control, pero con un accionamiento menor.

REFERENCIAS

- [1] <http://diccionario.raing.es/es/lema/im%C3%A1n> (17/08/2019)
- [2] <http://diccionario.raing.es/es/lema/im%C3%A1n-0> (17/08/2019)
- [3] <http://diccionario.raing.es/es/lema/im%C3%A1n-permanente> (17/08/2019)
- [4] <https://concepto.de/campo-magnetico/> (17/08/2019)
- [5] https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/magnetismo (17/08/2019)
- [6] http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ley_de_Gauss_para_el_campo_magn%C3%A9tico
- [7] https://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_de_Foucault
- [8] E.E. Staff del M.I.T Circuitos magnéticos y transformadores. LIBRO
- [9] <https://www.carrod.mx/products/inductancia-toroidal-330-uh-3-a> (18/8/2019)
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Electropermanent_magnet
- [11] <https://patents.google.com/patent/US4055824A/en> y
- [12] Castaño ÁR, Real F, Ramón-Soria P, et al. AI-Robotics team: A cooperative multi-unmanned aerial vehicle approach for the Mohamed Bin Zayed International Robotic Challenge. J Field Robotics. 2019;36:104–124. <https://doi.org/10.1002/rob.21810>
- [13] <https://www.mbzirc.com/challenge/2020>
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))
- [15] <https://www.supermagnete.es/adhesive-force-calculation>
- [16] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8276269>
- [17] https://www.youtube.com/watch?v=MptNafdF_q8
- [18] https://www.youtube.com/watch?v=KXBQA_OiOfk

ANEXO A: DATOS

La dos tablas siguientes muestran, respectivamente, los datos usados para crear las gráficas mostradas en la figura 3 – 5 y la figura 3 – 6.

Tabla A - 1. Datos para gráficas de la Figura 3 – 5

| Modelo: S_10_20_N Magnetización:N45 Fuerza nominal:4,4 kgf | | | | | | | | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| e=0,1 mm | d | 0 | 0,02 | 0,07 | 0,18 | 0,41 | 0,91 | 1,98 | 4,29 | 9,27 | 20 |
| | F | 0,392 | 0,376 | 0,367 | 0,372 | 0,329 | 0,287 | 0,22 | 0,139 | 0,064 | 0,014 |
| e=0,3 mm | d | 0 | 0,02 | 0,07 | 0,18 | 0,41 | 0,91 | 1,98 | 4,29 | 9,27 | 20 |
| | F | 1,15 | 1,137 | 1,104 | 1,044 | 0,972 | 0,822 | 0,629 | 0,357 | 0,105 | 0,015 |
| e=0,5 mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 1,891 | 1,866 | 1,817 | 1,757 | 1,633 | 1,458 | 1,219 | 0,835 | 0,36 | 0,082 |
| e=1 mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 3,496 | 3,432 | 3,367 | 3,208 | 2,961 | 2,524 | 1,818 | 0,959 | 0,364 | 0,082 |
| e=2mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 4,405 | 4,3 | 4,121 | 3,833 | 3,362 | 2,695 | 1,85 | 0,96 | 0,333 | 0,084 |
| e=3mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 4,41 | 4,305 | 4,126 | 3,835 | 3,364 | 2,694 | 1,849 | 0,961 | 0,341 | 0,083 |
| e=4mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 4,441 | 4,304 | 4,127 | 3,835 | 3,363 | 2,695 | 1,856 | 0,96 | 0,322 | 0,082 |
| Imán con imán | d | 0 | 0,03 | 0,08 | 0,21 | 0,5 | 1,14 | 2,6 | 5,89 | 13,31 | 30 |
| | F | 4,317 | 4,214 | 4,088 | 3,849 | 3,422 | 2,705 | 1,745 | 0,773 | 0,194 | 0,028 |

Tabla A - 2. Datos para gráficas de la Figura 3 – 6.

| Modelo: S_15_03N Magnetización: N45 Fuerza nominal=3,2 kg | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| e=0,1 mm | d | 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | F | 0,31 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| e=0,3 mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 0,948 | 0,924 | 0,864 | 0,824 | 0,743 | 0,704 | 0,546 | 0,387 | 0,196 | 0,043 |
| e=0,5 mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 1,575 | 1,53 | 1,489 | 1,408 | 1,26 | 1,102 | 0,849 | 0,535 | 0,214 | 0,045 |
| e=1 mm | d | e=1 mm | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 2,916 | 2,824 | 2,694 | 2,475 | 2,108 | 1,671 | 1,064 | 0,562 | 0,209 | 0,043 |
| e=2 mm | d | 0 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5 | 10 |
| | F | 3,14 | 3,017 | 2,833 | 2,584 | 2,162 | 1,671 | 1,063 | 0,557 | 0,21 | 0,043 |
| iman_iman | d | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,14 | 0,3 | 0,61 | 1,24 | 2,5 | 5,01 | 10,02 |
| | F | 3,048 | 2,949 | 2,846 | 2,646 | 2,324 | 1,843 | 1,249 | 0,652 | 0,215 | 0,036 |

Donde e se refiere al espesor de la placa, d a la distancia en milímetros entre la superficie de la placa y la superficie del imán y F a la fuerza en kgf de atracción que hay entre placa e imán. Para las filas referentes a dos imanes con caras opuestas enfrentadas, los parámetros están referidos a estos elementos. Los datos han sido aportado por la web: <https://www.supermagnete.es/adhesive-force-calculation>, donde se han introducido los modelos concretos y los espesores.

