

Capítulo 4:

Diseño de Prototipos.

4.1 Prototipo 1.

Durante los primeros meses de investigación se encontró que un diseño viable para los VTOL's es el de "hélice en ducto" (ducted fan). Este es un sistema de propulsión en el que la hélice va encerrada en un ducto.



Figura 4.1: Diseño Hélice en Ducto de Jayant Ratti.

El diseño reduce la pérdida de empuje que se tiene en las puntas de las hélices, además de aprovechar la presión del aire como se plantea en el principio de Bernoulli. Teniendo esto en cuenta, se diseñó un primer prototipo que tuviera estas características, utilizando el programa de CAD, SolidWorks 2007.

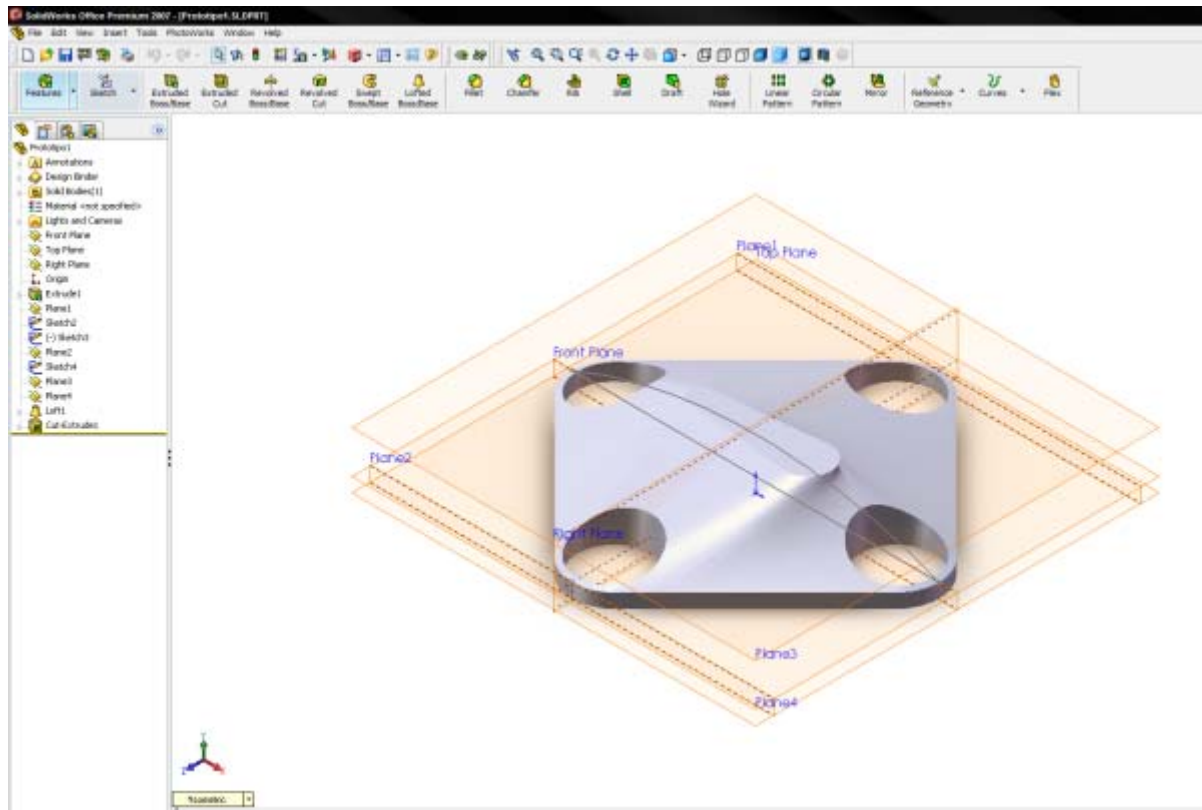


Figura 4.2: Diseño de Prototipo 1.

Sin embargo, este primer prototipo fue descartado debido a las desventajas que presentaría en un vehículo de la escala que se tenía pensado hacer. Este marco sería muy pesado, difícil de hacer, y además limitaría en gran manera el espacio que se tendría para poner los componentes dentro. Además, los espacios para las hélices debían tan solo un poco más grandes que las hélices y aún no se tenían las hélices a usar.

4.2 Prototipo 2.

Teniendo muy en cuenta que el vehículo debía de ser muy ligero y que además tuviera espacio suficiente para cargar los componentes, se procedió a diseñar ahora un prototipo que tuviera un diseño de marco tipo “X”, el cual ha sido el diseño más popular para los Quadrotors. Se tenía pensado hacer una base donde irían todos los componentes y que tuviera la capacidad de que se le ensamblaran unos brazos. También se tenía en mente ponerle una tapa protectora. Para esto fue necesario comprar el primer motor y hélice para hacer medidas, así como también modelarlos en 3D. Se compró de la tienda de aeromodelismo el motor de DC más potente que había, usado en distintos helicópteros de radio control de hasta 250 gramos de peso. Del mismo modo, se compro una hélice usada en helicópteros y aviones pesados. A continuación se muestra una foto



Figura 4.3: Motor de DC y Hélice para prototipo 2.

Motor DC 9v	
Potencia	20 W
Consumo de Corriente	2.2 A
Peso	70 gr
Carga máxima	250 gr
Tamaño de hélices máx	10x4.5
RPM max	6,000

Tabla 4.1: Especificaciones de Motor DC 9v.

El motor tiene dos pines en la parte de abajo para conectarlo a la batería, uno en positivo y negativo. También viene con un piñón de 36 dientes que tuvimos que quitar para poder acoplar la hélice a la flecha.

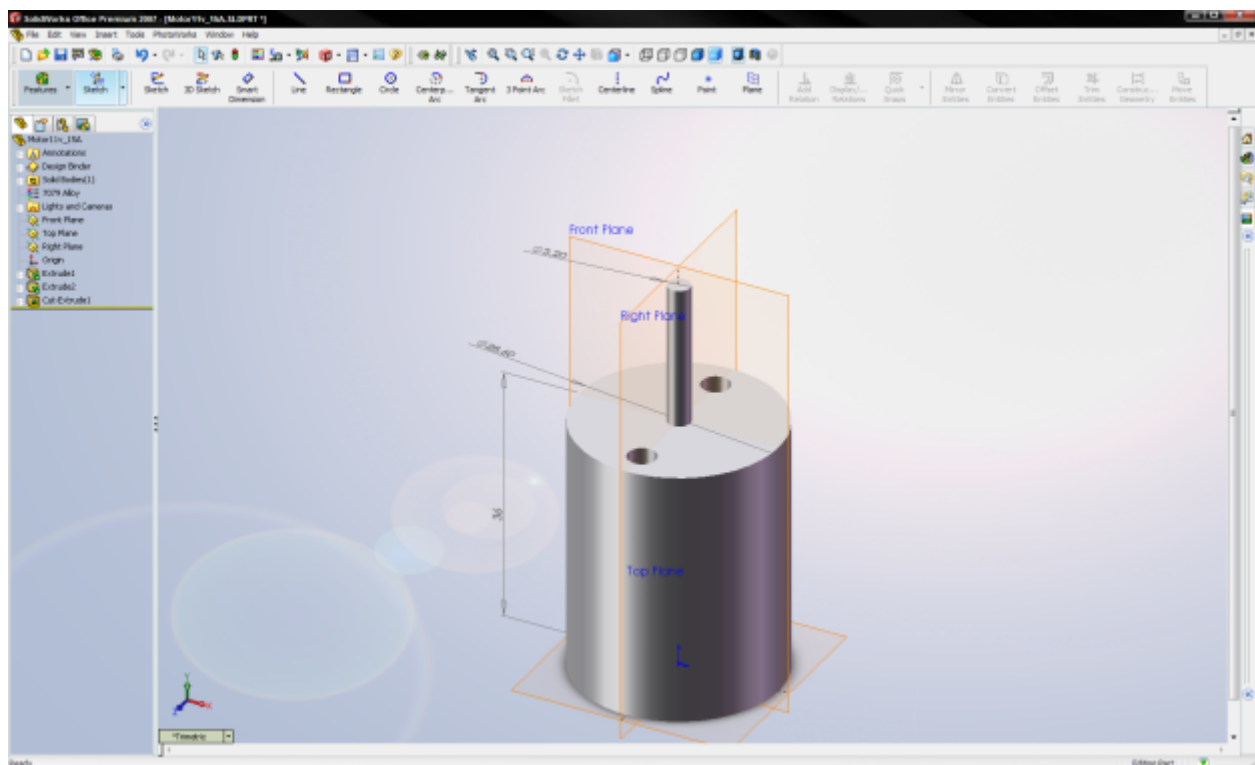


Figura 4.4: Solidworks – Motor DC 9v.

El motor tiene una longitud de 36 mm, un diámetro de 28.6mm y un diámetro en la flecha de 3.20mm. Aunque inicialmente no se tenía pensado dibujar las hélices, fue importante hacerlo ya que notamos que el orificio que tenía la hélice para el rotor del motor era demasiado grande, es decir, la hélice le quedaba floja al motor. Se le hizo una especie de horquilla usando cartón para acoplarlo momentáneamente.

La hélice es de plástico y tiene un diámetro total de 200mm así como un diámetro de centro de 25mm y un barreno para el rotor de 4mm. A esta hélice se le denominó con el nombre: Hélice1.

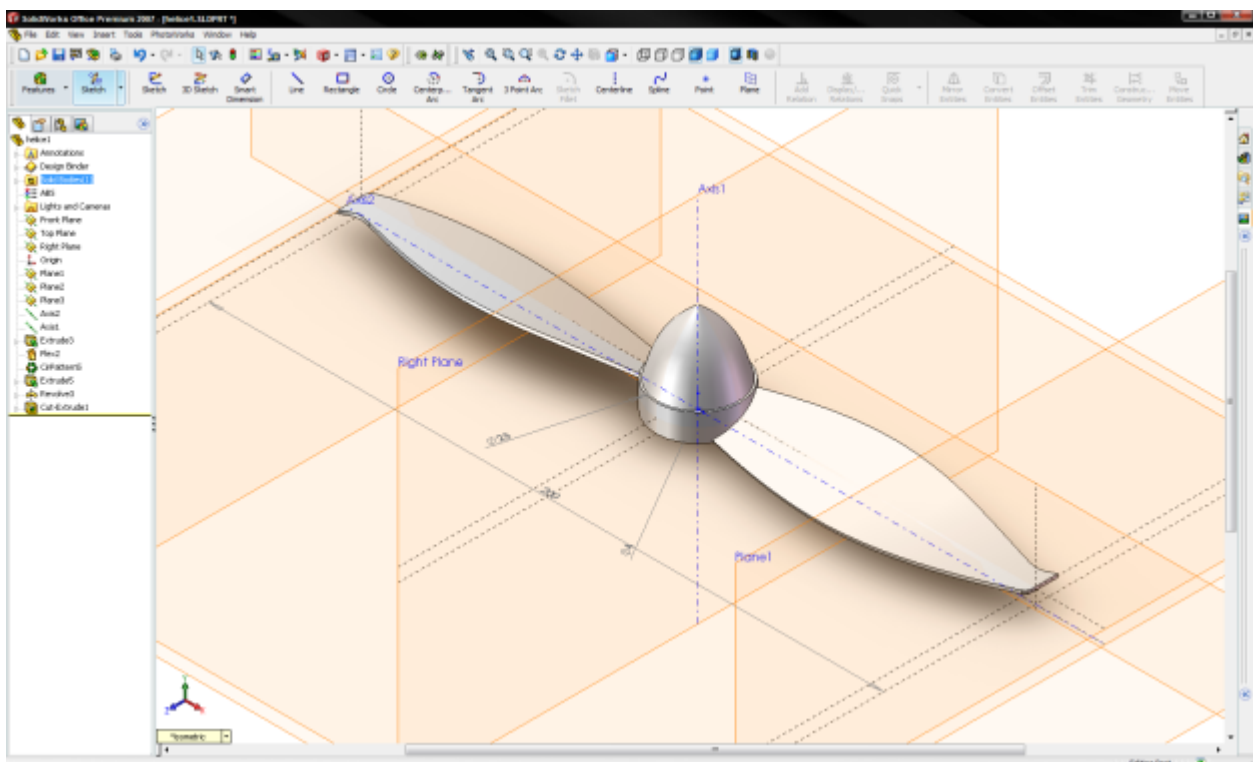


Figura 4.5: Solidworks - Hélice 1.

Teniendo las medidas de la hélice y del motor se procedió a hacer el diseño del primer prototipo, comenzando con los brazos que sujetarían al motor y que irían montados

en la base. Se tenía pensando hacer un brazo que sujetara al motor y que además tuviera una especie de canal que pudiese proteger los cables que irían del motor a la batería. También debían de tener una longitud suficiente para poder librar las hélices y que no existiera una posible colisión entre ellas. Por lo tanto, se determinó que los brazos debían de tener una mínima longitud de 100mm. En la figura 4.6 se presenta un bosquejo en 3D.

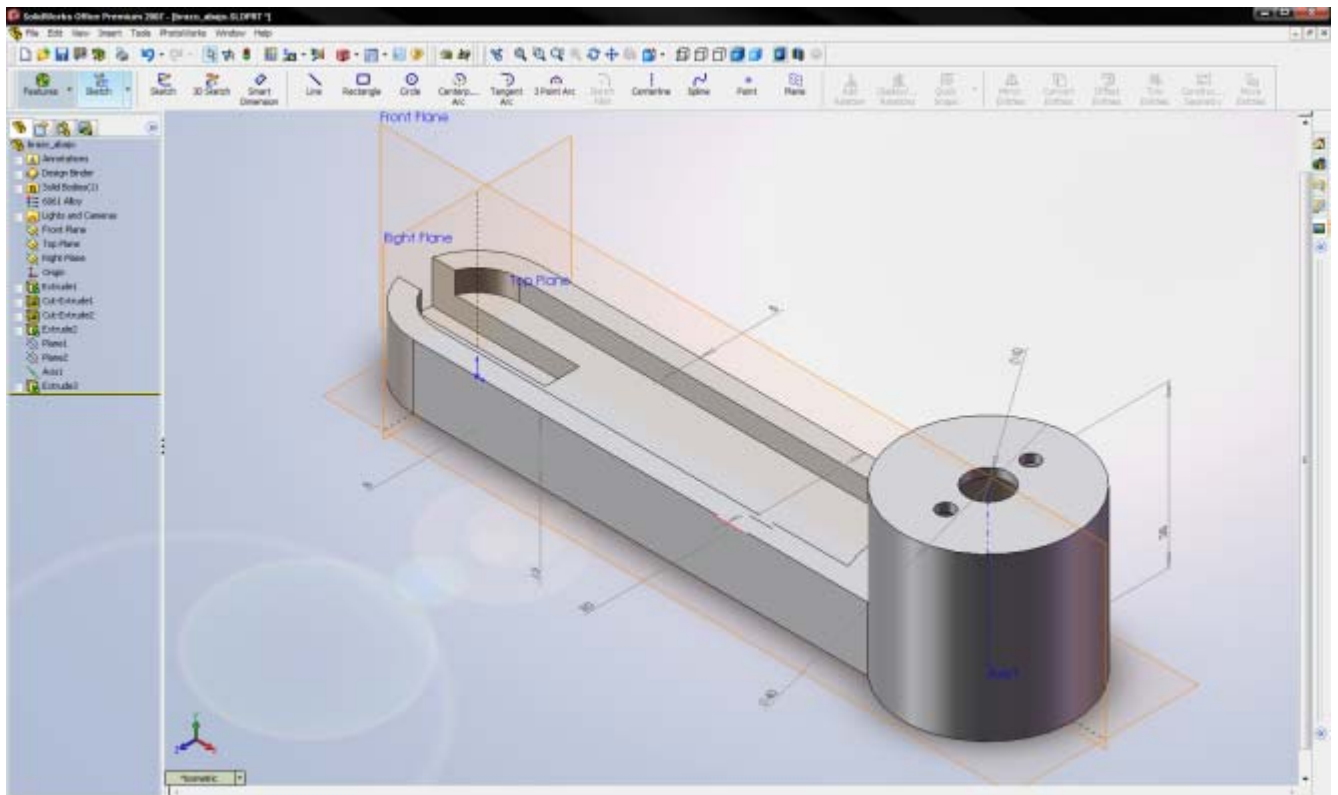


Figura 4.6: Prototipo 2 Solidworks – Brazo 1.

Finalmente se procedió a diseñar la base, teniendo en cuenta la longitud y el ancho de los brazos así como también que debería tener espacio suficiente para cargar la batería y demás componentes. La base debía de ser lo suficientemente fuerte como para soportar el peso de los brazos y muy importante, los torques que generarían los motores.

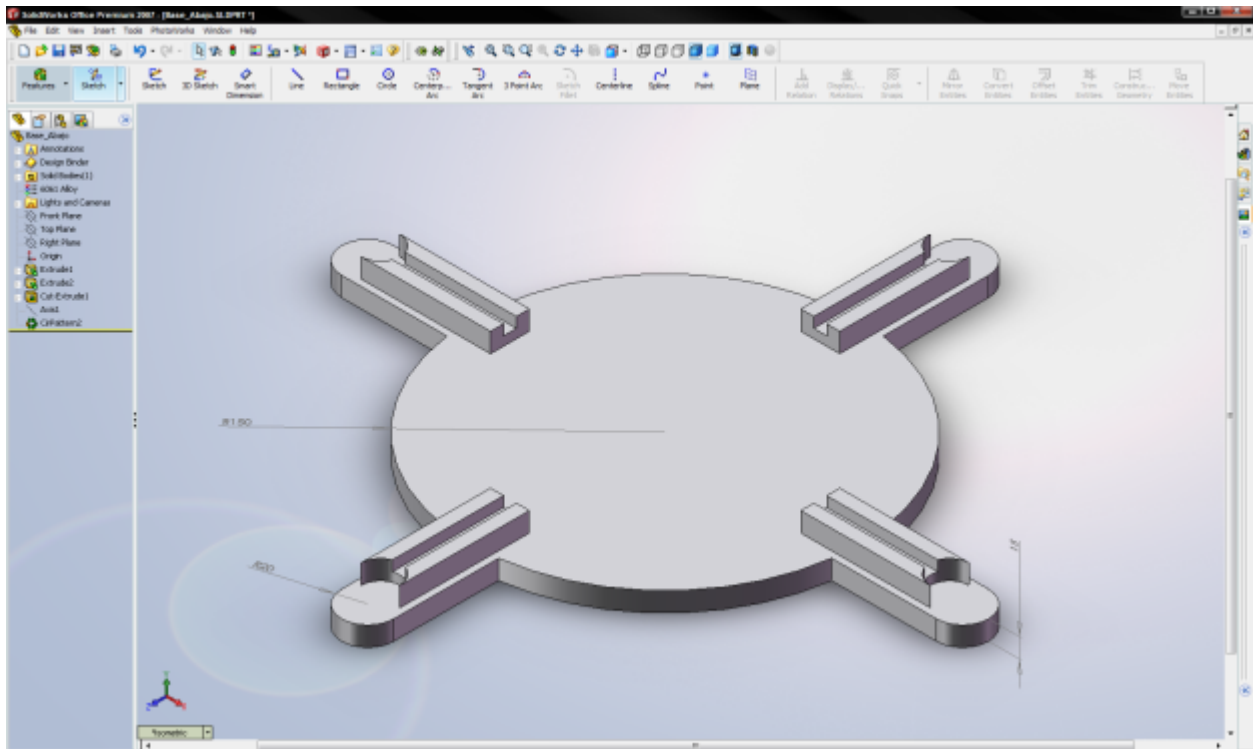


Figura 4.7: Prototipo 2 Solidworks – Base.

La base tenía un espesor de 15 mm, un radio de 150 mm y tenía 4 brazos separados a 90° que servían para sujetar los otros brazos ya diseñados y que también contaban con un canal de protección para los cables. También se diseño una tapa de plástico transparente cuya utilidad sería únicamente para proteger los componentes que cargaría la base. Una vez que se tenía esto, se procedió a hacer un ensamble de todo, teniendo cuidado de fijar todos los componentes y ajustar todo tal y como si fuera la realidad. Los motores irían fijados a los brazos por la parte de arriba, donde ambos tienen barrenos para tornillos de tipo M2.5x5. Se obtuvo lo siguiente:

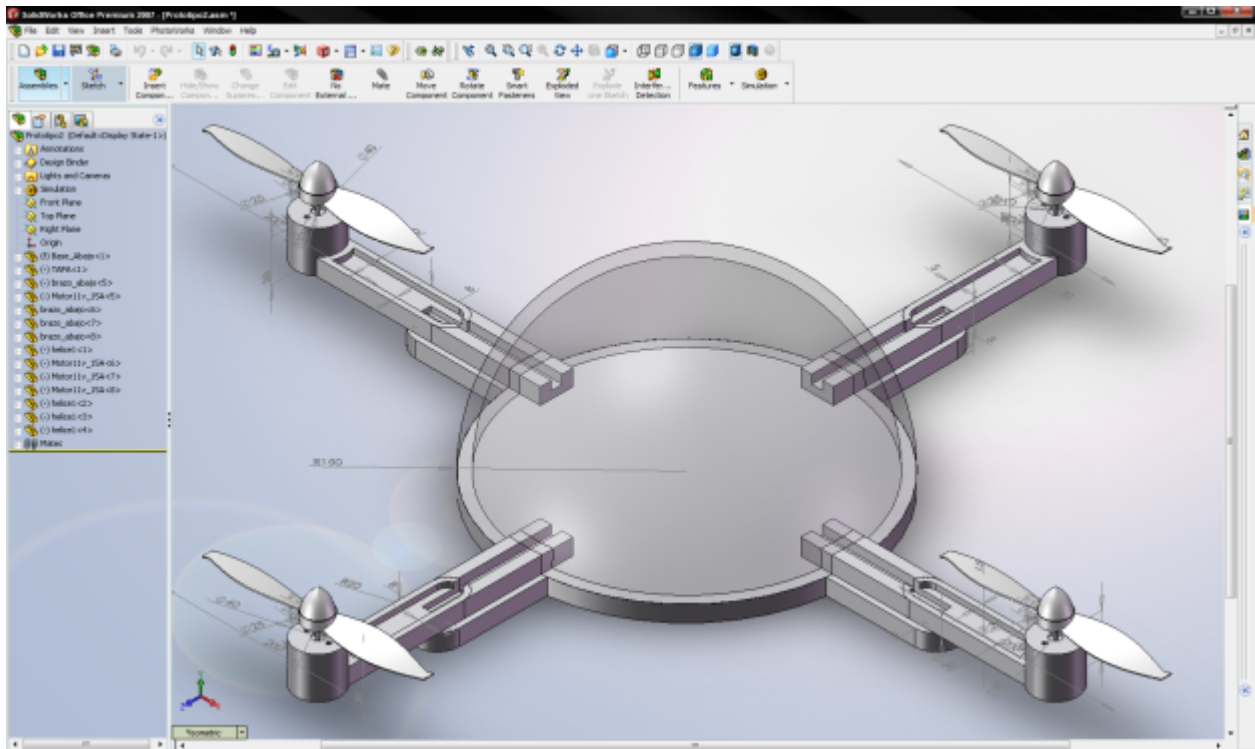


Figura 4.8: Prototipo 2 Solidworks -



Ensamble.

Figura 4.9: Prototipo 2 Render.

Una vez que se tenía todo ensamblado, se procedió a asignarles el material a las partes del helicóptero. Se asignó el material Aluminio 6061 los brazos y a la base. Con esto, nos dimos cuenta que el helicóptero simplemente sería demasiado pesado si se hacía el marco de este material. El compañero de tesis, encargado de la parte de Control del vehículo, procedió a hacer un prototipo rápido con los componentes que se tenían para ver si estos serían capaces de levantar un marco muy ligero.

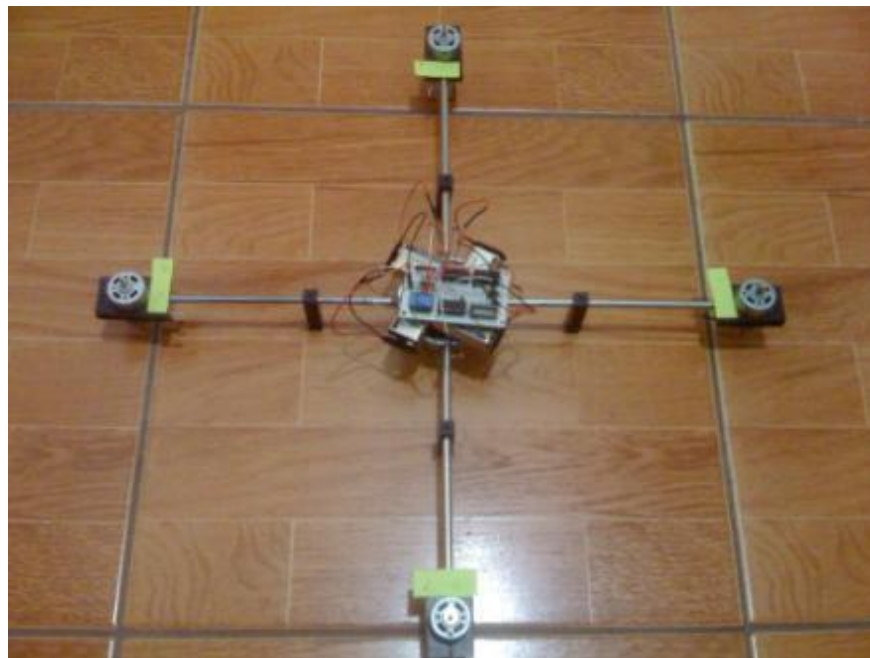


Figura 4.10: Estructura de acero para prototipo 2.

Con esta estructura fabricada con acero inoxidable se percataron 2 problemas graves que se tenían con estos componentes. El primero era que la estructura no se levantaba debido a que los motores no giraban lo suficientemente rápido, posteriormente se averiguó que esos motores debían de ir montados a una caja de engranes reductora, la cual estaba agotada en todas las tiendas. El segundo era que las hélices no servían de mucho si no eran de paso invertido. Lo que pasó es que se cometió el error de pensar que

las hélices servirían en ambas direcciones, es decir, si una hélice gira en sentido de las manecillas del reloj, empuja sacando aire hacia abajo. Sin embargo, si la misma hélice se pone a girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, no empujara ni sacará aire de la misma manera. De hecho, se notó que si se giraban al revés, prácticamente no sacaban aire en el sentido deseado. Esto sería un grave problema ya que entonces se tendrían que voltear los motores y girar como normalmente lo hacen, pero ahora las hélices tendrían que empujar en lugar de jalar. Al investigar un poco más sobre el tema se aclaró que las hélices deben de ser de **paso invertido** para así tener el mismo ángulo de ataque y generar la misma fuerza de empuje si se giran en sentidos opuestos.

4.3 Prototipo 3.

Una vez que se hizo una investigación más a fondo y también se evaluó la eficiencia y utilidad de los componentes, se decidió mandar hacer el pedido de la lista final de los componentes a la compañía canadiense *Dragonfly Innovations Inc.* Estos componentes, detallados en el capítulo anterior, fueron determinantes para que el helicóptero volara. De nuevo se siguió la misma lógica de diseño, una base en el centro, y 4 brazos salientes que sujetaran los motores. Sin embargo, ahora para ahorrar peso, se tomó en cuenta que el centro tuviera una placa de algún plástico o material ligero, y que ahora los componentes podían ir en 2 niveles, para mantener así un vehículo lo más compacto posible.

Una vez que llegaron los componentes, se procedió a dibujar las hélices y motores en Solidworks, para así tener las medidas exactas para hacer los brazos y la base. Ahora también se tomo en cuenta que se debían de modelar todos los componentes grandes para poder hacer un prototipo más preciso. A continuación se muestran los componentes.

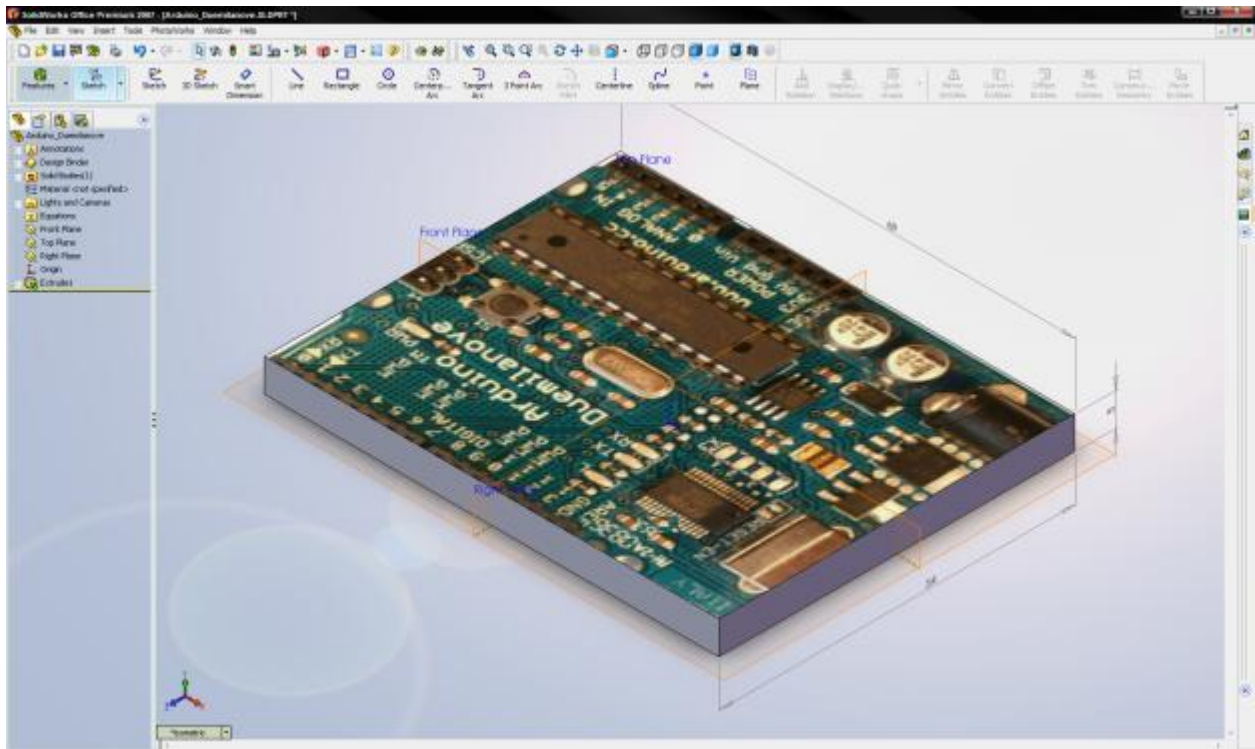


Figura 4.11: Prototipo 3 Solidworks -
Arduino.

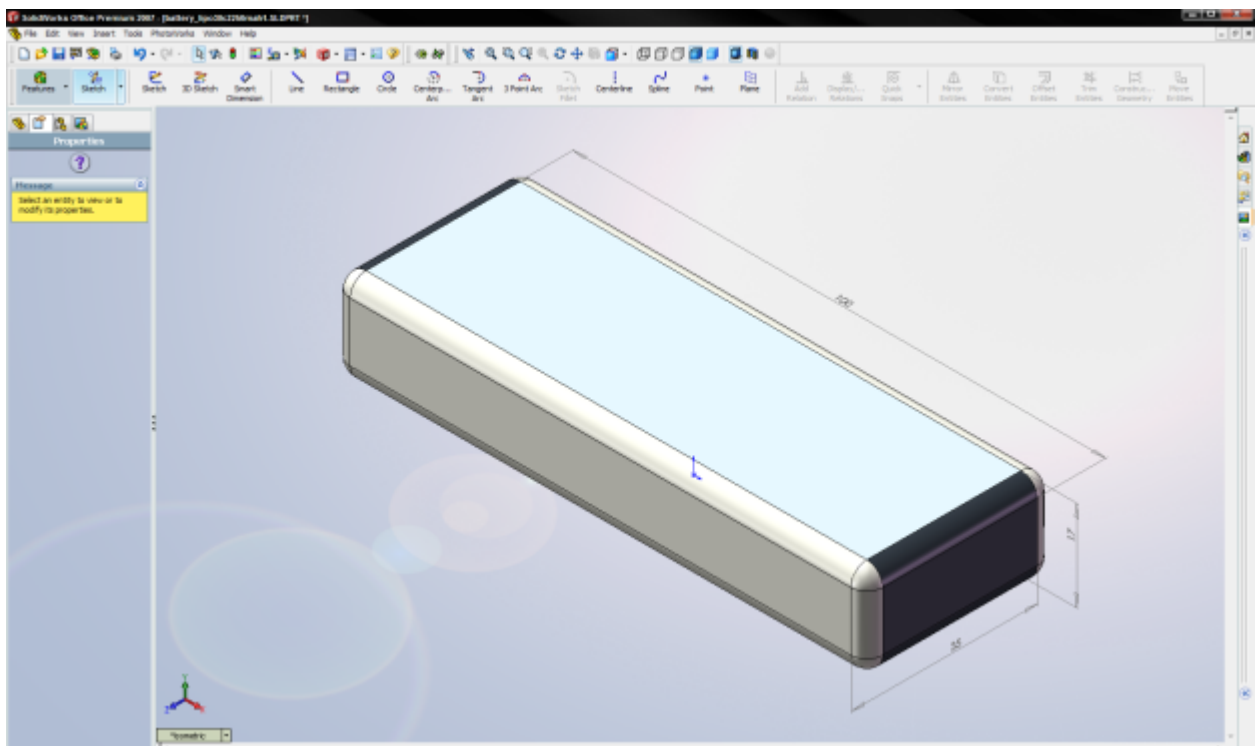


Figura 4.12: Prototipo 3 Solidworks – Batería LiPo.

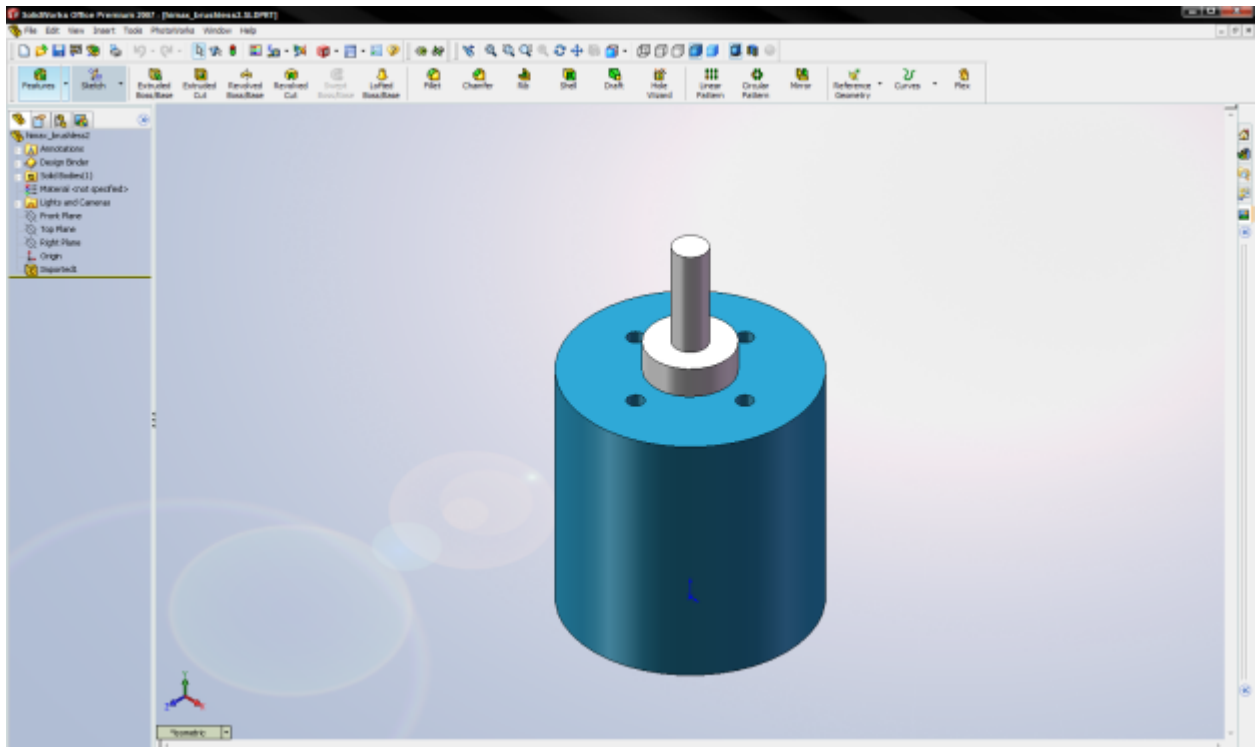


Figura 4.13: Prototipo 3 Solidworks - Motor Brushles

HIMAX.

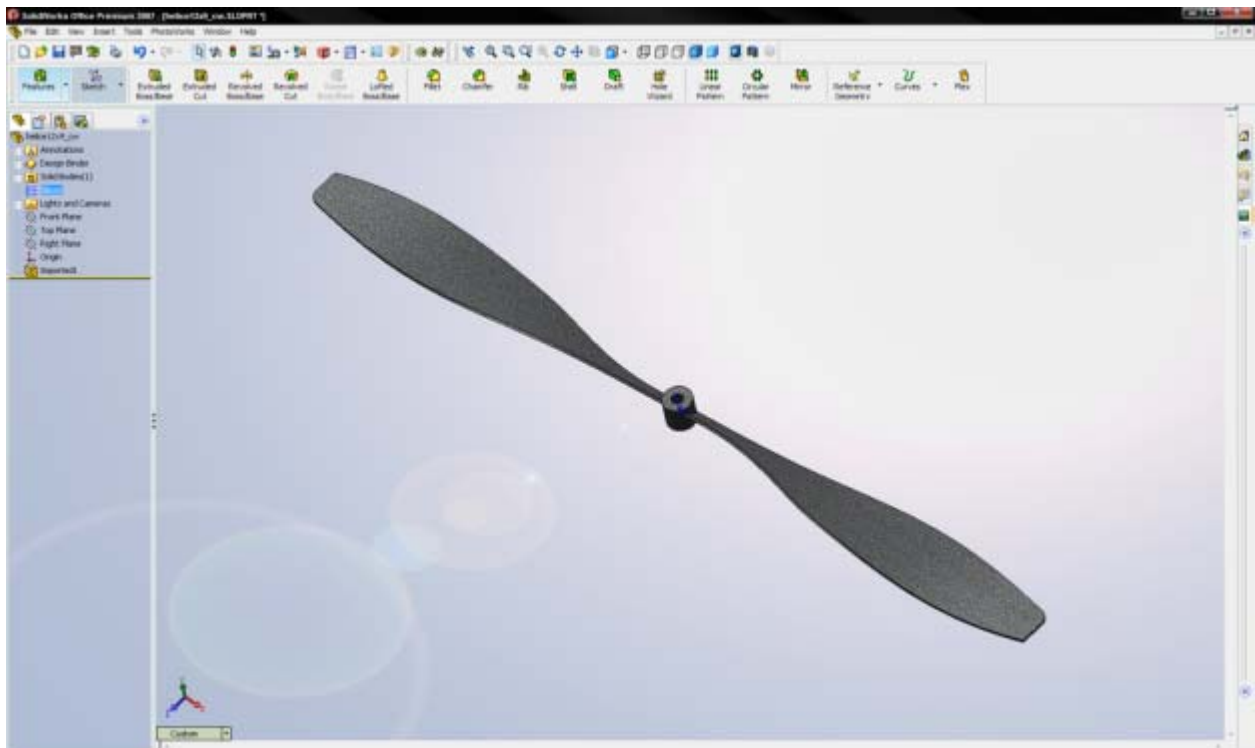


Figura 4.14: Prototipo 3 Solidworks – Hélices de Paso Invertido 12x4.5.

Teniendo estos componentes en cuenta y sus medidas, se procedió a hacer los brazos. Aquí se comenzó diseñando el siguiente brazo: (Ver Anexo C para dibujo detallado)

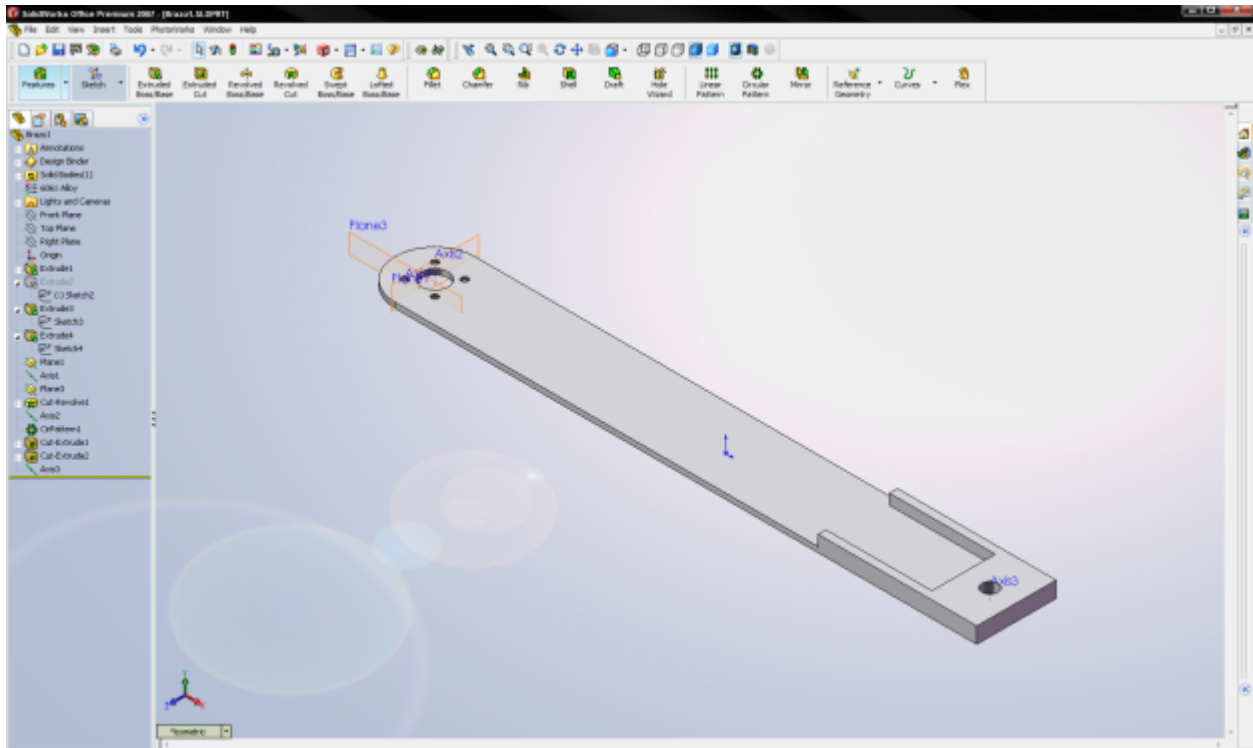


Figura 4.15: Prototipo 3 Solidworks – Brazo 1.

Se le asignó el mismo material contemplado, Aluminio 6061 y se procedió a hacer una prueba de esfuerzo de elementos finitos para ver si la estaba en riesgo de ruptura la pieza. La prueba mostró que todo estaba bien, tomando en cuenta los valores máximos de esfuerzos que se presentarían en los brazos, de acuerdo con las fórmulas presentadas en el marco teórico:

$$\tau_{ind} = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{P_{conv}}{\omega}$$

Si se toman en cuenta las especificaciones del fabricante del motor, donde la potencia máxima es de 150 watts, y la velocidad máxima del motor es de 20,000 rpm, entonces se tiene que el Torque que produce cada motor es de:

$$\tau_{ind} = \frac{150w}{2094.41 \frac{rad}{s}} = 0.071 Nm$$

De la ecuación de fuerza de levantamiento, se calculó la fuerza máxima que producirían las hélices si se consideran las siguientes variables.

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{ref} C_L$$

$$\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 2 * \pi * r * 60 * n = 319.18 \text{ m/s}$$

$$S_{ref} = \pi * 0.1524^2 = 0.073 \text{ m}^2. \text{ (en base a las hélices usadas de 12x4.5)}$$

$$C_L = 1$$

Entonces:

$$L = 4480.75 \text{ N approx.}$$

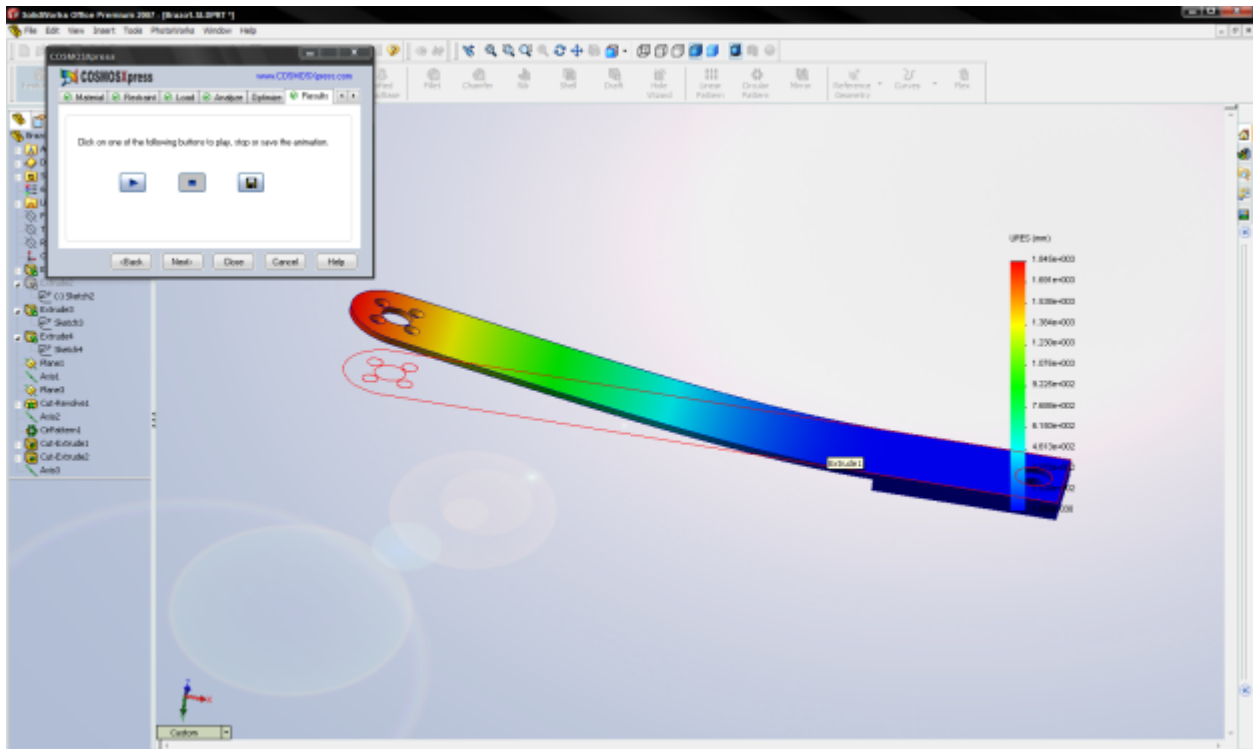


Figura 4.16: Prototipo 3 – Distribución de Desplazamientos en Brazo 1.

Property Name	Value	Units
Elastic modulus	6.9e+010	N/m ²
Poisson's ratio	0.33	NA
Shear modulus	2.6e+010	N/m ²
Mass density	2700	kg/m ³
Tensile strength	1.2408e+008	N/m ²
Yield strength	5.5149e+007	N/m ²
Thermal expansion coefficient	2.4e-005	/Kelvin
Thermal conductivity	170	W/(m.K)
Specific heat	1300	J/(kg.K)

Tabla 4.2: Resultados de Solidworks.

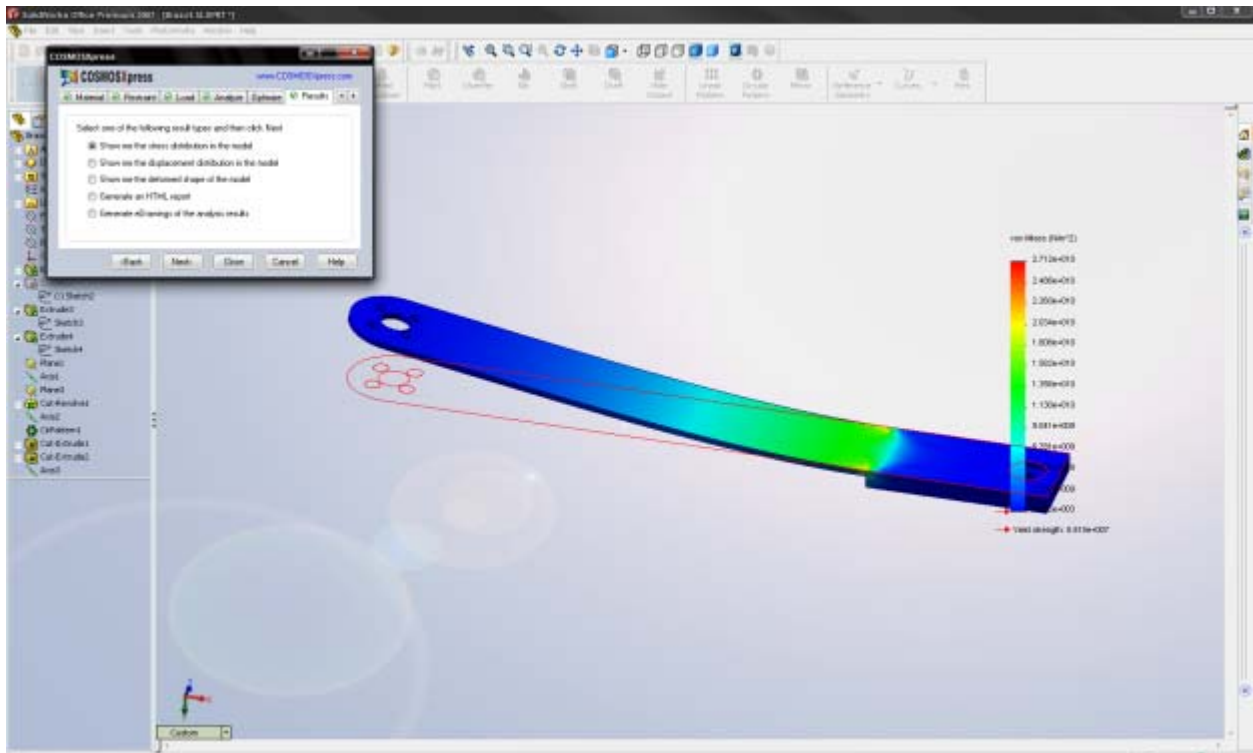


Figura 4.17: Prototipo 3 – Distribución de Esfuerzos en Brazo 1.

Lo que se puede observar de la figura 4.16 es que la parte donde va el motor es la que sufre un mayor desplazamiento, es decir, la deformación que sufre el brazo desplaza esa sección donde va el motor más. De la figura 4.17 se puede observar la distribución de esfuerzos, donde se ve exagerada la deformación que sufre la pieza, también se puede observar que los puntos de contacto que sufren mayor esfuerzo son los que unen la pieza con la base. Sin embargo, la prueba muestra que la pieza está dentro de un rango seguro y que no existen lugares de peligro en cuanto a esfuerzos. Sin embargo, al pensar en el maquinado real y los esfuerzos a los que se sometería la pieza, se pensó que tal vez estaría muy delgada para poderse manufacturar, y por tal motivo se procedió a hacer un segundo brazo un poco más grueso y ligeramente más pequeño, denominado Brazo 2.

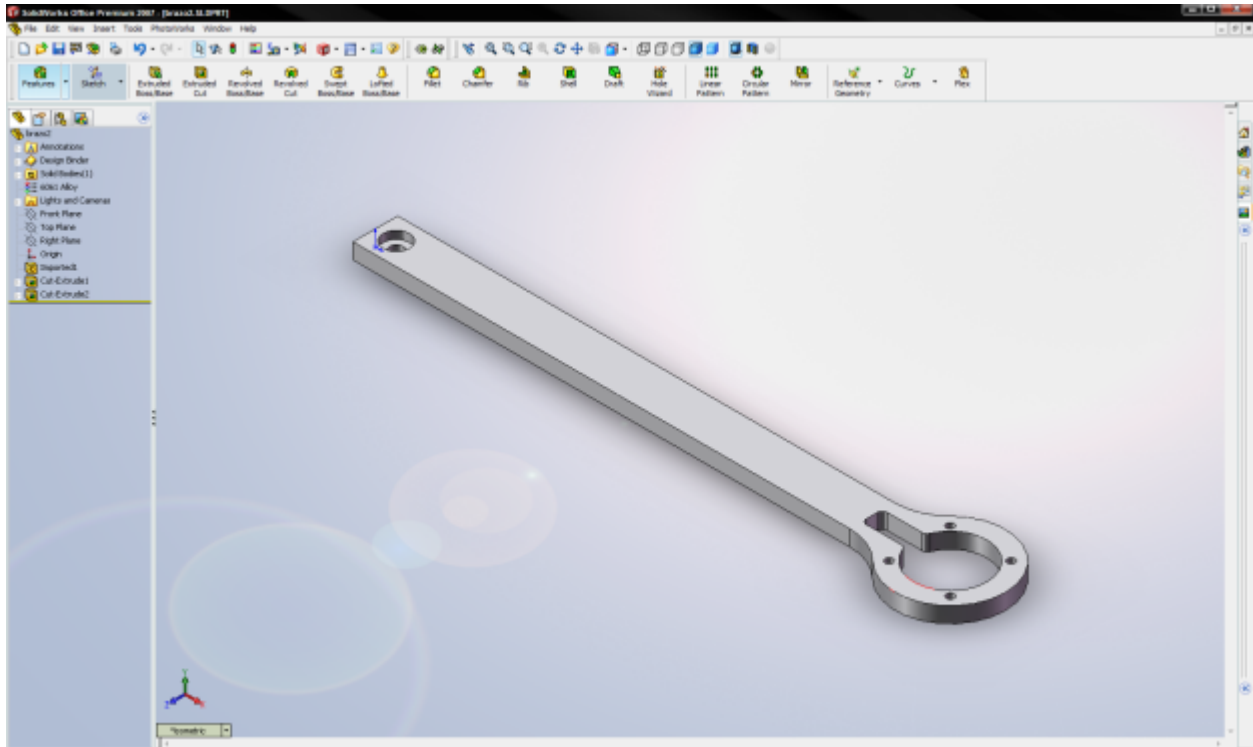


Figura 4.18: Prototipo 3 Solidworks – Brazo 2.

A este brazo se le dejó un espacio extra en la parte donde va el motor para así poder pasar los cables que salen del motor por ahí. Ver *Anexo E* para más detalles del dibujo técnico. Se le realizaron también las mismas pruebas de esfuerzo y no se observó ningún problema. Este brazo debería de ir ensamblado con el motor usando una estrella que fue proporcionada con los motores en el momento de envío.

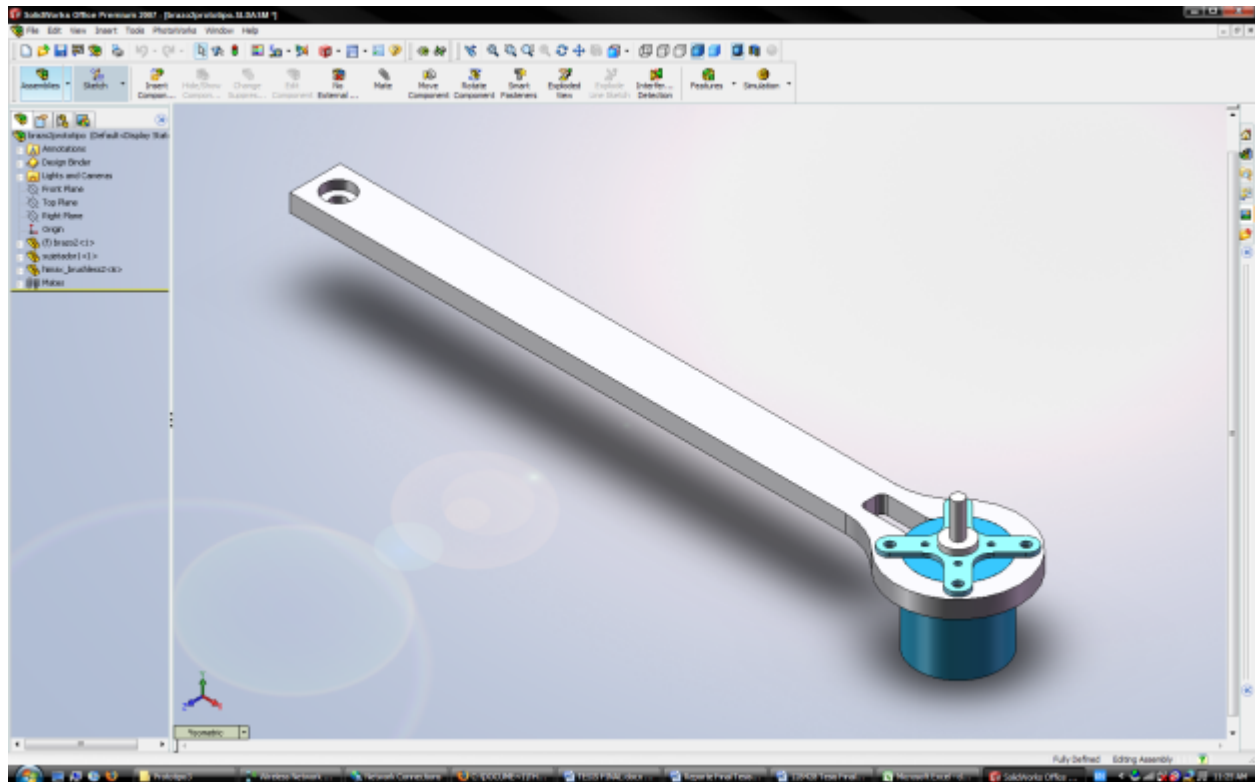


Figura 4.19: Prototipo 3 Solidworks – Ensamble de Brazo2 con motor.

Se procedió a diseñar la base teniendo en cuenta que debía de ser muy ligera y que además debía tener espacio suficiente para los componentes. Teniendo en mente también las medidas del brazo 1 y que se usaría este para el prototipo final.

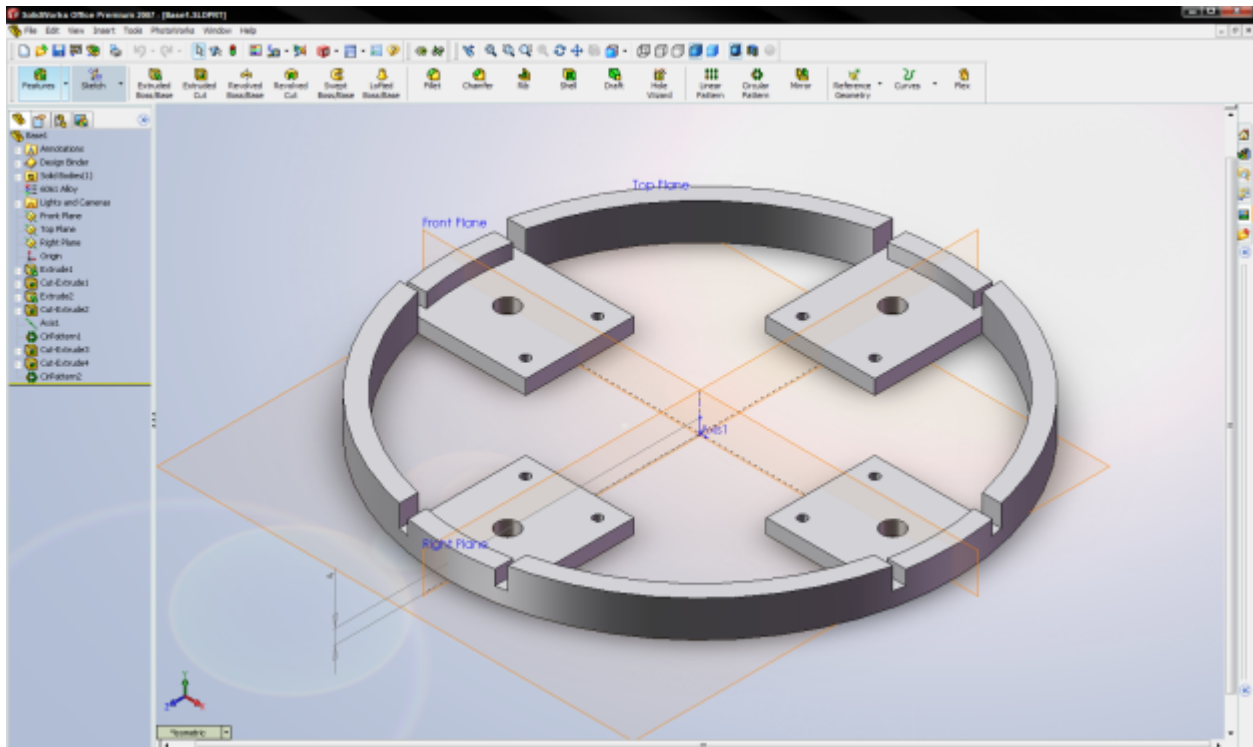


Figura 4.20: Prototipo 3 Solidworks - Base 1.

Esta base estaría hueca por dentro, para ahorrar peso, tendría un anillo exterior de 5mm de espesor y cuatro brazos internos para sujetar los brazos (Ver Anexo D). Algo importante de esta pieza es que tiene esos rieles en los brazos que sirven para darle estabilidad a los brazos y siempre mantenerlos en posición. Se le realizó una prueba de elementos finitos también.

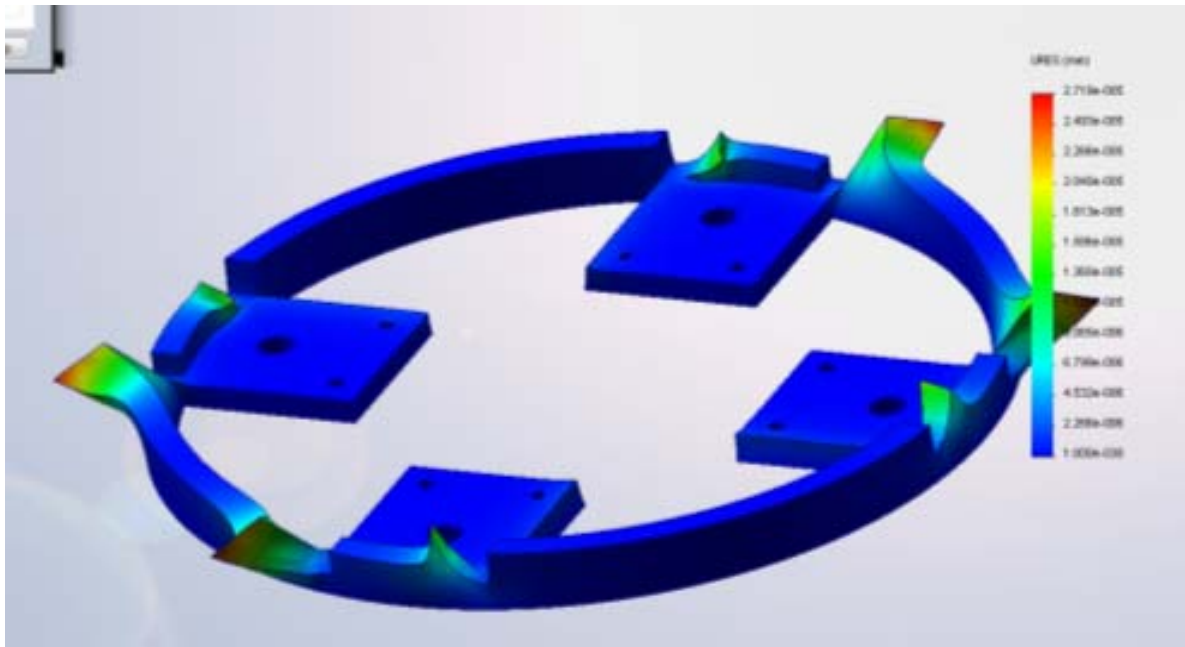


Figura 4.21 Prototipo 3 Solidworks – Distribución de Desplazamientos en Base 1.

Aquí se puede ver exagerado el desplazamiento en la pieza como resultado del torque que genera el motor. Se podría decir que el diseño es correcto, ya que el máximo desplazamiento o deformación que se observa es de 2.7×10^{-5} mm. Se procedió a seguir con el diseño de la placa de dos niveles que sujetaría al Arduino y a la batería de LiPo, siendo estos, los componentes más grandes.

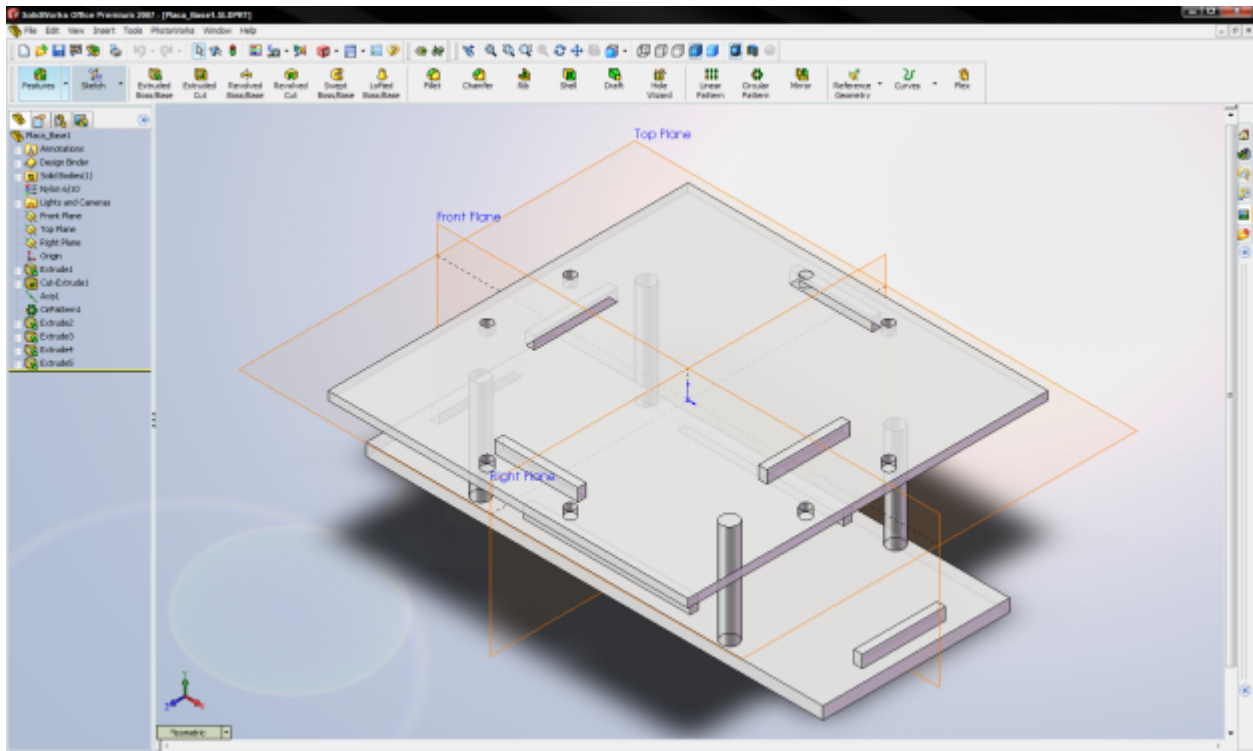


Figura 4.22 Prototipo 3 Solidworks: Placa Base 1.

En esta placa va montado en la parte superior el Arduino, tiene hecho a la medida un espacio denotado por las cuñas. En la parte de abajo, a 25mm de la parte de arriba se encuentra el otro nivel, hecho específicamente a la medida de la batería de LiPo que se pidió. Ver el *Anexo F* para un dibujo técnico más detallado.

Cabe resaltar que todo se centro de manera simétrica para siempre tener el mismo centro de masa. Una vez que se termino de diseñar la placa, se procedió a hacer un ensamble de todos los componentes para ver que en efecto todo estuviese hecho al a medida.

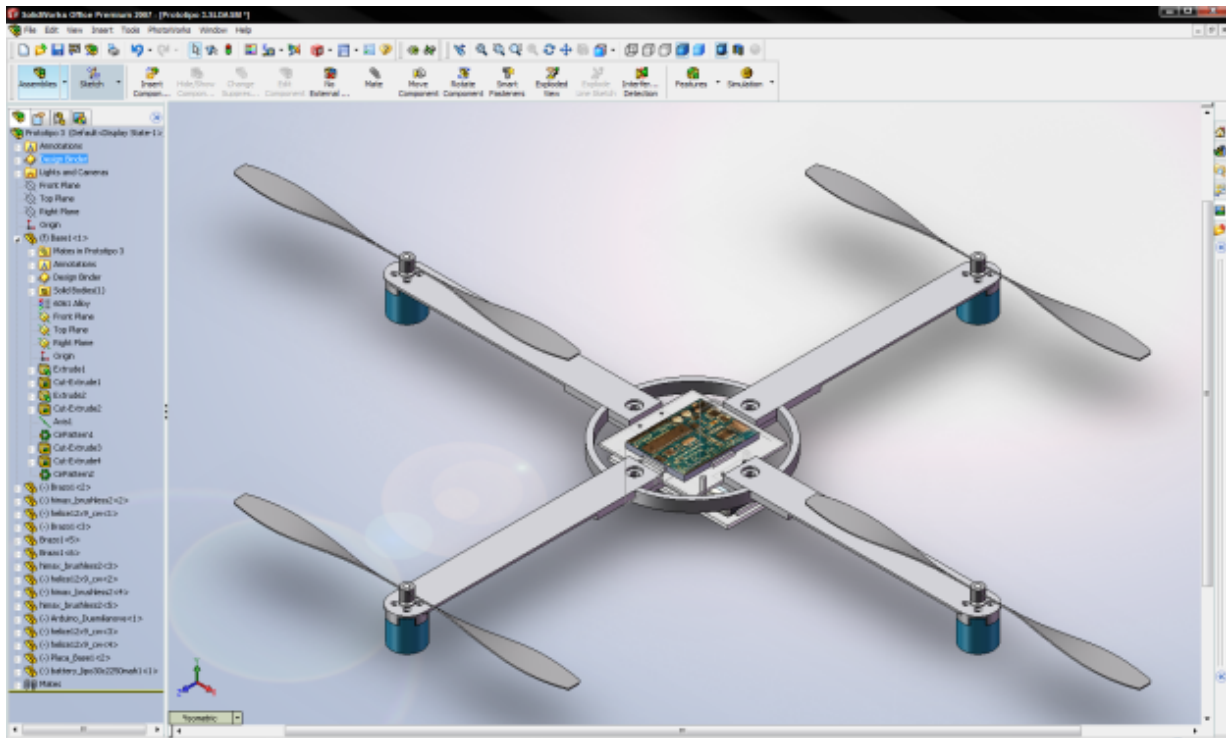


Figura 4.23: Prototipo 3 Solidworks – Ensamble final.

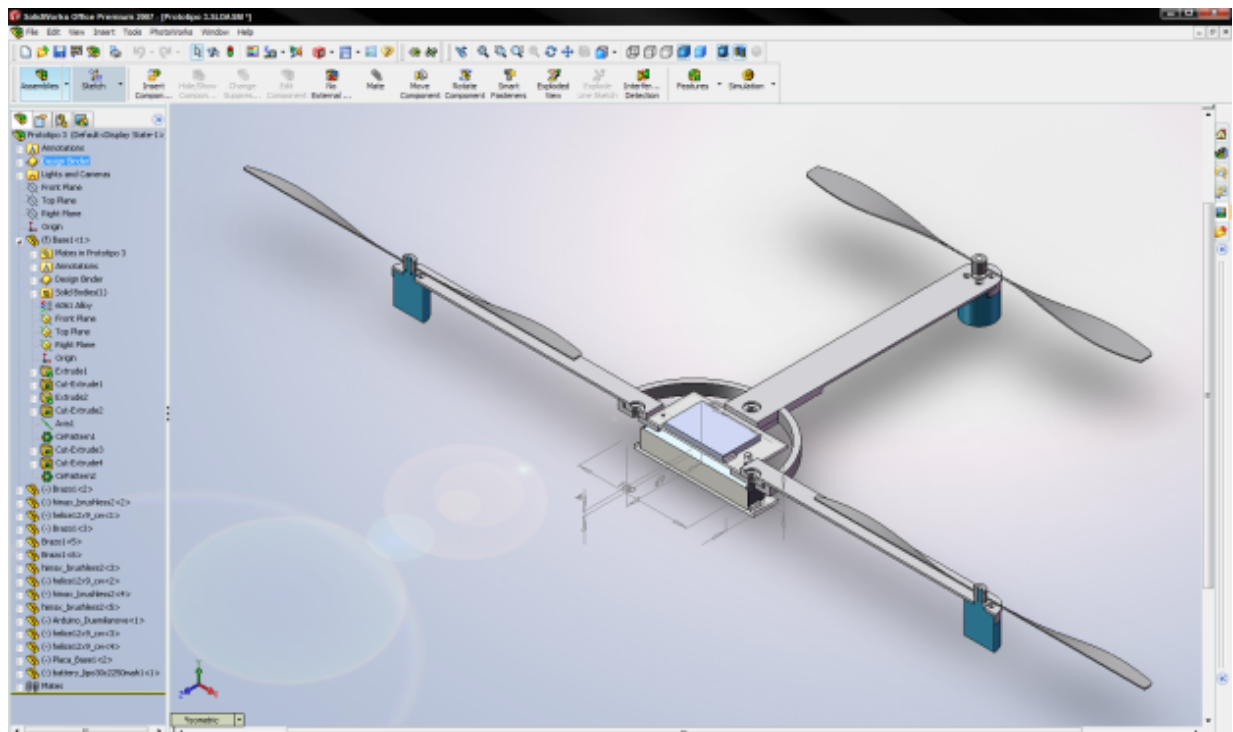


Figura 4.24: Prototipo 3 Solidworks – Vista en sección de ensamble.

Con esto se comprobó que ahora el prototipo ya tenía todo lo necesario para poder volar, se mandó maquinar todas las piezas, y se procedió a hacer el prototipo físicamente.

Se especificó que para el maquinado se debía de tener cuidado con la Base ya que habría que partir de una pieza cuadrada de 150x150mm, de donde se tendría que desbastar toda la parte central. Se debe proceder muy despacio para no debilitar el aluminio. Si se avanza muy rápido con las brocas, el calor que estas producen debido a la fricción hace que literalmente se derrita el aluminio y que se flexione. Además se deben utilizar diferentes tamaños de broca para poder hacer las juntas y los radios correspondientes.

Del mismo modo, para maquinar los brazos se debe partir de una solera de 1pulgada de ancho por 1/8 de pulgada de espesor. Se deben de tener las mismas precauciones para evitar debilitar o flexionar el material.