

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

JULIO 2014

Adrián Areces González

Álvaro Noriega González

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	5
3. DISEÑO ELÉCTRICO	7
3.1 GENERADOR	7
3.2 MOTOR ELÉCTRICO	12
3.3 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	15
3.4 ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y CONTROL.....	16
4. DISEÑO MECÁNICO.....	18
4.1 SELECCIÓN DE MATERIAL.....	18
4.2 DISEÑO DEL BASTIDOR	25
4.3 CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS	36
4.4 ENSAYOS.....	51
5. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL PROTOTIPO	64
5.1 FABRICACIÓN	66
5.2 MONTAJE	73
6. CONCLUSIONES.....	81
7. BIBLIOGRAFÍA.....	82
8. ANEXOS.....	83
8.1 ANEXO I. PIEZAS DISEÑADAS MEDIANTE SOLIDWORKS	83
8.2 ANEXO II. ENSAYOS MEF MEDIANTE SOLIDWORKS	83
8.3 ANEXO III. PLANOS MÉCANICOS	83
8.4 ANEXO IV. PRESUPUESTO	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Participación de los países en programas de bicicletas [3].....	2
Figura 2: Resumen de bicicletas ofertada en el mercado	4
Figura 3: Representación generador eléctrico	8
Figura 4: Representación unión generador-pedales	8
Figura 5: Geometría externa de generador eléctrico diseñado.....	9
Figura 6: Medición longitud eje de pedalier	10
Figura 7: Separación rueda-platos.....	11
Figura 8: Medición del ancho del eje pedalier	11
Figura 9: Explosionado motor-hub	13
Figura 10: Gráfico características eléctricas	14
Figura 11: Motor-hub	15
Figura 12: Supercondensador utilizado.....	16
Figura 13: Esquema convertidor Boost.....	16
Figura 14: Esquema simplificado DRV8332	17
Figura 15: Esquema convertidor DAB.....	17
Figura 16: Mapa de selección de materiales 1: Densidad mínima para una resistencia dada [6] .	20
Figura 17: Mapa de selección de materiales 2: Densidad mínima para una rigidez dada [6].....	20
Figura 18: Mapa de selección de materiales 14: Mínimo coste para una resistencia dada [6]	21
Figura 19: Mapa de selección de materiales 15. Mínimo coste para una rigidez dada [6]	21
Figura 20: Geometría cuadro bicicleta	25
Figura 21: Primer diseño de cuadro en madera.....	27
Figura 22: Pipa de primer diseño	27
Figura 23: Anclaje rueda trasera de primer diseño	28
Figura 24: Soporte intermedio de primer diseño.....	28
Figura 25: Vista superior de primer diseño en madera	29
Figura 26: Segundo diseño de cuadro	30
Figura 27: Bastidor de diseño definitivo	30
Figura 28: Roscados para tija de bastidor definitivo.....	31
Figura 29: Roscados para unión trasera de bastidor definitivo	31
Figura 30: Anclaje para sillín de bastidor definitivo.....	32
Figura 31: Zona de asiento para el generador eléctrico	32
Figura 32: Sujeción de la horquilla definitivo.....	33
Figura 33: Dirección bicicleta comercial	33
Figura 34: Unión trasera definitiva	34
Figura 35: Brazo trasero definitivo	34
Figura 36: Conjunto definitivo de cuadro	35
Figura 37: Geometría de cuadro diseñado.....	35
Figura 38: Distancias mínimas entre agujeros y bordes.....	36
Figura 39: Horquilla simplificada	38
Figura 40: Ensamblaje para simulación de uniones atornilladas	39
Figura 41: Menú selección de análisis	39

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Figura 42: Menú configuración masas remotas	40
Figura 43: Representación de fuerzas	41
Figura 44: Selección de material	41
Figura 45: Apoyo delantero.....	42
Figura 46: Apoyo trasero.....	42
Figura 47: Selección tipo de contacto entre piezas	43
Figura 48: Configuración contacto entre piezas.....	44
Figura 49: Configuración de unión mediante tornillos	44
Figura 50: Configuración final.....	45
Figura 51: Configuración de malla.....	45
Figura 52: Mallado	46
Figura 53: Esquema ensayo de choque	52
Figura 54: Esquema ensayo de fatiga por pedaleo	53
Figura 55: Esquema ensayo fatiga fuerza vertical	54
Figura 56: Configuración contacto entre piezas.....	59
Figura 57: Configuración malla	59
Figura 58: Ensayo sentado sin pedaleo, Tensión máxima: $52,71 \times 10^6$ N/m ²	60
Figura 59: Ensayo sentado con pedaleo, Tensión máxima: $52,14 \times 10^6$ N/m ²	60
Figura 60: Ensayo de pie sin pedaleo, Tensión máxima: $37,98 \times 10^6$ N/m ²	61
Figura 61: Ensayo de pie con pedaleo, Tensión máxima: $97,22 \times 10^6$ N/m ²	61
Figura 62: Ensayo carga frontal, Tensión máxima: $65,37 \times 10^6$ N/m ²	62
Figura 63: Zonas críticas en ensayo de pie con pedaleo	62
Figura 64: Resultado de modificación de bastidor	63
Figura 65: Vista lateral modificación de bastidor	63
Figura 66: Bastidor aligerado	64
Figura 67: Sección circular hueca	65
Figura 68: Sección rectangular maciza	65
Figura 69: Espesores de chapa	66
Figura 70: Corte chorro por agua	66
Figura 71: Esquema corte chorro por agua	67
Figura 72: Balsa de agua corte por chorro de agua	68
Figura 73: Mecanizado.....	69
Figura 74: Centro de mecanizado.....	69
Figura 75: Progama CNC.....	70
Figura 76: Operación de fresado	71
Figura 77: Operación de taladrado	71
Figura 78: Operación de roscado	71
Figura 79: Mecanismo cambio de herramienta	72
Figura 80: Representación piezas fabricadas	73
Figura 81: Montaje sujeción horquilla	74
Figura 82: Resultado montaje sujeción horquilla.....	74
Figura 83: Montaje sujeción horquilla - bastidor	75
Figura 84: Resultado montaje sujeción horquilla - bastidor	75
Figura 85: Montaje unión trasera - bastidor	75
Figura 86: Resultado montaje unión trasera - bastidor	76
Figura 87: Montaje brazo trasero - unión trasera	76

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Figura 88: Resultado montaje brazo trasero - unión trasera.....	76
Figura 89: Resultado final del montaje del cuadro	77
Figura 90: Rueda delantera 26"	77
Figura 91: Rueda trasera con hub-motor.....	78
Figura 92: Manillar, potencia y puños	78
Figura 93: Dirección horquilla	78
Figura 94: Horquilla delantera	78
Figura 95: Manetas de freno.....	79
Figura 96: Freno delantero V-brake	79
Figura 97: Sillín y tija de sillín.....	79
Figura 98: Resultado final del conjunto	80
Figura 99: Pedales y bielas.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Requisitos de potencia para distintos medios de transporte [2]	2
Tabla 2: Resumen medidas generador	11
Tabla 3: Características principales de la máquina eléctrica [7]	12
Tabla 4: Datos ensayos motor-hub.....	14
Tabla 5: Características del convertidor.....	15
Tabla 6: Ponderación de materiales	22
Tabla 7: Características mecánicas de Aleación 6061 y Acero aleado	24
Tabla 8: Medidas cuadro bicicleta	25
Tabla 9: Fuerzas resultantes en tornillos	47
Tabla 10: Características de tornillos por métricas	47
Tabla 11: Requisitos tornillo más solicitado	51
Tabla 12: Resultados por métricas	51
Tabla 13: Métodos de fabricación de piezas diseñadas.....	73

1. INTRODUCCIÓN

La realización de este proyecto consiste en el diseño del cuadro de una bicicleta en la cual se sustituye la transmisión y el cambio mecánicos por una transmisión eléctrica.

Para ello se dispone de un generador eléctrico con el que el ciclista produce la energía eléctrica mediante el pedaleo para así alimentar un motor de continua que hace girar la rueda trasera.

Este proyecto ha sido desarrollado conjuntamente con el Máster de Conversión de Energía Eléctrica y Sistemas de Potencia de la Universidad de Oviedo, el cual ha participado de forma activa en la implementación del sistema de control eléctrico, así como en el diseño y fabricación del generador eléctrico, a través de dos de sus proyectos finales de máster ambos tutorados por el Dr. Pablo García Fernández, cotutor de este proyecto.

Estos proyectos son los siguientes:

- "Design and simulation of an electrical power system of a pure electric bicycle", realizado por Enrique Rodríguez Díaz
- "High efficiency electric generator for chain-less bicycle", realizado por Fernando Álvarez González

Ha existido una coordinación durante la ejecución de los tres trabajos con el fin de obtener un prototipo funcional que sirva para probar la tecnología.

Las tareas que engloban este proyecto son las siguientes:

- Diseño y fabricación del cuadro de la bicicleta
- Establecer la geometría y características del generador eléctrico
- Establecer la características del motor trasero
- Trabajar como nexo de las tres partes que intervienen en el proyecto

El diseño del modelo del cuadro de la bicicleta ha sido desarrollado mediante Solidworks en su versión 2012, haciendo uso de su módulo de elementos finitos para evaluar las tensiones y deformaciones a partir de las condiciones de contorno y carga que se establecieron para los distintos ensayos del cuadro de la bicicleta.

1.1 ANTECEDENTES

A continuación, se hace un breve resumen de cómo ha ido evolucionando la consideración de la bicicleta dentro de las políticas medioambientales por parte de los países.

La contaminación atmosférica es un tema que preocupa especialmente hoy en día, donde el 20% de las emisiones de CO₂ son producidas por el transporte terrestre [1], concentrándose

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

especialmente en las grandes ciudades. Por eso, resulta de gran utilidad la utilización de medios de transporte que reduzcan estas emisiones o la utilización de un transporte limpio, por lo tanto los vehículos completamente eléctricos están cobrando una gran importancia en la actualidad.

En la siguiente figura se muestra los requisitos de potencia para distintos medios de transporte:

KWh/Passenger/speed= Energy-per-km	Boeing 747 jumbo jet	Queen Mary or large ocean liner	SUV or large car	Bicycle	Person on foot
Weight	369 tons (fully loaded)	81,000 tons	2.5 tons	100 kg with person	80kg (176 lb)
Cruising speed	900km/h (560 mph)	52km/h (32mph)	100km/h (62mph)	20km/h (12.5mph)	5km/h (3.1mph)
Maximum power	77,000kW (100,000hp)	120,000kW (160,000hp)	200kW (275hp)	2000 W (professional)	2000 W
Energy at cruising	65,000kW (87,000hp)	90,000 kW (120,000hp)	130 kW (174hp)	80 W (0.1hp)	280 W (0.38 hp)
Passengers	450	3000	4	1	1
Power/passenger	140 kW	40kW	50kW	80 W	280 W
Energy/passenger/km	580 kilo joule*	2800 kilo joule*	1800 kilo joule*	14.4 kilo joule*	200 kilo joule*

Tabla 1: Requisitos de potencia para distintos medios de transporte [2]

La bicicleta destaca como el medio de transporte terrestre que necesita menos potencia y energía por kilómetro, por lo que debido a su eficiencia y sostenibilidad con el medio ambiente resulta el medio de transporte óptimo para zonas urbanas.

Desde el año 2000 se han realizado muchas iniciativas a nivel mundial para concienciar al ciudadano del uso de la bicicleta, así como medidas para facilitar el acceso a una bicicleta. En el año 2013 el número de países que desarrollaron dichas medidas fue de 48, en comparación con los 8 países del año 2000, lo que refleja significativamente la evolución del fomento del uso de este transporte por parte de los países [3].

En el siguiente gráfico se muestra la evolución de las medidas para fomentar la utilización de la bicicleta por regiones:

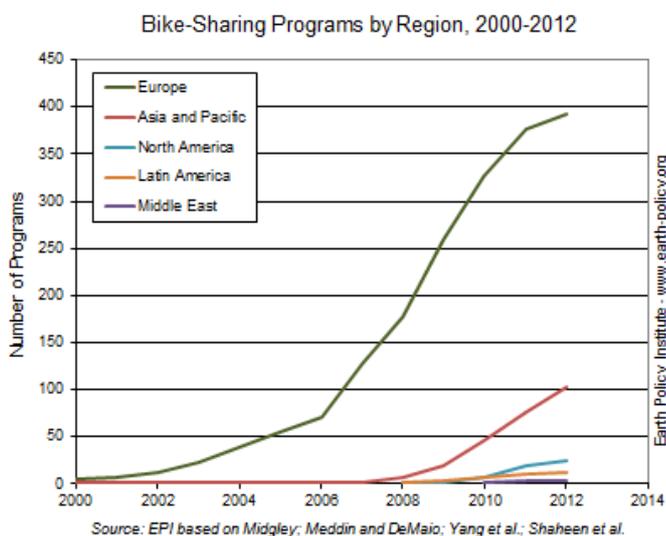


Figura 1: Participación de los países en programas de bicicletas [3]

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Actualmente el mercado de las bicicletas híbridas/eléctricas es un sector emergente donde no hay mucha variedad en cuanto a las características eléctricas de estas y a su sistema de transmisión. Como en cualquier otro sector emergente, este se está adaptando a lo que existía previamente, por lo que la práctica más habitual ha sido el añadir los sistemas necesarios para convertir las bicicletas a híbridas o eléctricas, pero sin realizar un diseño completamente desde cero de estas, para así evitar un posible rechazo del consumidor.

Por lo que las bicicletas híbridas/eléctricas de hoy en día son bicicletas tradicionales a las que se les ha sido añadido:

- Sistema de almacenamiento de energía
- Sistema electrónico de potencia para el control del sistema
- Motor de continua, por lo general en la rueda trasera

1.2 ESTADO DEL ARTE

A continuación se muestra un breve resumen de la oferta que hay actualmente en este sector, fueron seleccionados cuatro modelos de una conocida marca que se caracteriza por sus bajos precios:



Modelo: Bebike 500

Material: Acero

Batería: Litio-Ion Samsung 24V 8A, 192Wh

Transmisión: Piñones 6 velocidades

Motor: Brushless rueda trasera 250W

Peso: 25,2 Kg

Precio: 750€



Modelo: Bebike 700

Material: Aluminio

Batería: Litio-Ion Samsung 36V 8A, 288Wh

Transmisión: Piñones 7 velocidades

Motor: Brushless rueda trasera 250W

Peso: 23,2 Kg

Precio: 1000€

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica



Modelo: 7E

Material: Aluminio

Batería: Litio-Ion Samsung 24V 8A, 192Wh

Transmisión: Piñones 21 velocidades

Motor: Brushless rueda delantera 250W

Peso: 26,5 Kg

Precio: 1000€



Modelo: Bebike 900

Material: Aluminio

Batería: Litio-Ion Samsung 36V 10A, 192Wh

Transmisión: Piñones 7 velocidades

Motor: Brushless rueda delantera 250W

Peso: 26Kg

Precio: 1500€

Figura 2: Resumen de bicicletas ofertadas en el mercado

Se observa que no hay grandes diferencias entre las bicicletas, las diferencias más significativas son:

- Capacidad de la batería
- Posición del motor
- Número de piñones

1.3 OBJETIVOS

Las bicicletas eléctricas ofertadas actualmente en el mercado siguen manteniendo la transmisión mecánica y utilizan el sistema eléctrico como una ayuda al pedaleo, lo que difiere con las características de este proyecto donde se busca una bicicleta sin transmisión mecánica, eliminando los siguientes elementos:

- Platos
- Piñones
- Cadena
- Desviador delantero

- Desviador trasero

El sistema eléctrico de este proyecto no funciona como una ayuda al pedaleo si no que es el encargado, de manera exclusiva, de mover la bicicleta.

Las características que definen a la bicicleta de este proyecto son las siguientes:

- El sistema incluye dos máquinas eléctricas, una trabajando como generador y la otra como motor aunque es interesante la posibilidad de que esta última pudiera trabajar por momentos como generador y devolver la energía al sistema.
- Se dispone de un elemento de almacenamiento de energía
- El sistema es de transmisión eléctrica no de propulsión eléctrica, la diferencia reside en que en nuestro sistema la energía proviene del pedaleo del ciclista no de un sistema externo, por lo que si se deja de pedalear, se deja de aportar energía y la bicicleta se irá parando progresivamente.
- La bicicleta ha sido diseñada para un uso de bajas exigencias, como bicicleta de paseo por lo que la demanda de la potencia de las máquinas no será muy elevado, en torno a 250-500W.
- La bicicleta dispone de un sistema colocado en el manillar con el que controlar las relaciones de cambio.
- El cuadro de la bicicleta ha sido diseñado específicamente para albergar las máquinas eléctricas, el sistema de almacenamiento de energía, así como todos los convertidores de potencia. El resto de componentes son comerciales por lo que el diseño del cuadro cumple los estándares de medidas de estos elementos.
- El diseño del cuadro de la bicicleta ha sido desarrollado para cumplir lo más posible la normativa *UNE-EN 14764* que especifica los *requisitos de seguridad y métodos de ensayo para bicicletas de paseo* [4], aunque lo que se pretende obtener de este proyecto es un prototipo y no un producto final comercializable.

2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Para empezar a definir el sistema han sido establecidos los parámetros de par y potencia que genera un ciclista en condiciones normales ya que al no tener una transmisión mecánica que traduzca directamente el pedaleo en movimiento es necesario saber estos dos parámetros para seleccionar el generador y el motor de la bicicleta que traduce la energía en movimiento. Estos cálculos han sido realizados previamente y los resultados se muestran a continuación:

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Las especificaciones del generador están vinculadas con el comportamiento del ciclista ya que es quien genera la energía, las características del pedaleo son [5]:

- Máxima cadencia de pedaleo: 110 rpm
- Par de 20Nm para 200W a 91 rpm

Por lo tanto las características del generador serán [5]:

- Potencia nominal: **200-250 W**
- Par nominal: **21 Nm**
- Velocidad máxima: **120 rpm**

Las especificaciones del motor también están vinculadas con el comportamiento del ciclista y, además, con la relación de transmisión.

Las características del motor son [5]:

- Potencia nominal: **200-300 W**
- Par nominal: **18,37 Nm**
- Velocidad máxima: **300 rpm**

Una vez establecidas las características del generador y del motor se evalúa el comportamiento que tendría el conjunto de la bicicleta y se comprueba si es apropiado instalar las máquinas eléctricas con las características anteriores. Se establece su velocidad máxima y pendiente máxima que podría superar.

La bicicleta ha sido diseñada para ser utilizada en zonas urbanas montando ruedas convencionales de 26", se obtuvo [5]:

- Velocidad máxima: **37,32 Km/h**

Suponiendo un peso del conjunto de 100Kg (80kg ciclista y 20kg bicicleta) y despreciando la resistencia aerodinámica ya que al ir superando una pendiente la velocidad es baja, se obtuvo [5]:

- Pendiente máxima: **5,67%**

Cada máquina eléctrica dispondrá de un convertidor de potencia para controlar el flujo de potencia, a su vez es necesario otro convertidor de potencia para el almacenamiento de la energía.

Una vez establecidas las especificaciones eléctricas se determinan las mecánicas, es decir las que van relacionadas directamente con el diseño del cuadro de la bicicleta:

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

- La fabricación debe adaptarse a los medios de los que dispone la Universidad
- Deben poder acoplarse las máquinas eléctricas anteriormente especificadas
- Diseño de cuadro lo más innovador posible
- Posibilidad de sustituir componentes del cuadro de forma sencilla para poder seguir trabajando en este proyecto en años posteriores.
- El tipo de cuadro debe ser rígido ya que la bicicleta es de paseo, además así se consigue un peso más reducido
- El cuadro debe ser lo más ligero posible pero debe poder soportar los esfuerzos a los que está sometido en un uso cotidiano.
- Deben poder acoplarse componentes comerciales como: sillín, horquilla, manillar, potencia, ...
- Debe poder albergar la electrónica de potencia necesaria, así como el sistema de almacenamiento de energía.
- No llevará freno mecánico en la rueda trasera pero si en la delantera.

3. DISEÑO ELÉCTRICO

El diseño eléctrico de este proyecto se divide en cuatro partes bien diferenciadas que son:

- Generador
- Motor eléctrico
- Almacenamiento de energía
- Electrónica de potencia y control

3.1 GENERADOR

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de los dos elementos principales que lo componen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática que se denomina estátor.

Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético para que el otro lo transforme en electricidad.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen. Así, nos encontramos con dos grandes grupos de máquinas eléctricas rotativas: los alternadores y las dinamos.

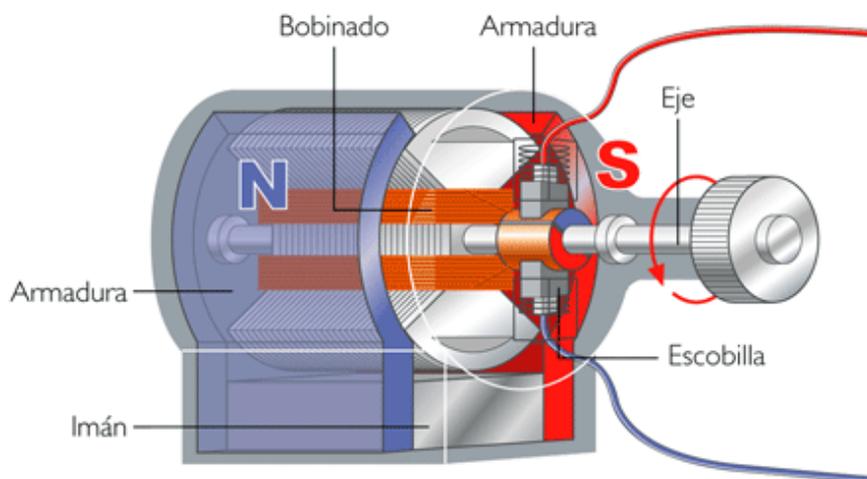


Figura 3: Representación generador eléctrico

En este proyecto el generador transforma la energía mecánica del pedaleo en energía eléctrica para alimentar el motor que hace girar la rueda trasera, su propio eje está conectado a las bielas por lo que el generador solicitado tiene que tener una salida del eje por cada uno de sus lados, como se muestra en al siguiente figura:

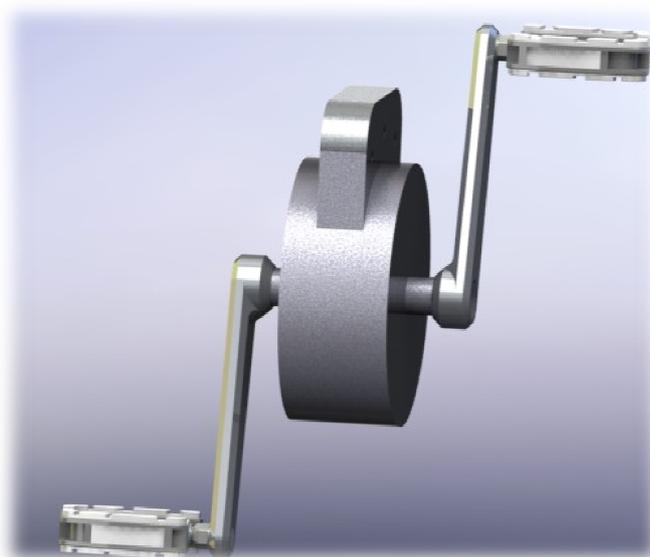


Figura 4: Representación unión generador-pedales

Obtener un generador con eje de salida por ambos lados ha provocado que fuera muy complicado de encontrar, si además se necesitaba que cumpliera los requisitos eléctricos anteriormente establecidos y que fuera de una geometría adecuada para el uso en una bicicleta, ha resultado imposible encontrar un modelo comercial que cumpliera con nuestras necesidades.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Como solución se ha optado por diseñar y construir nuestro propio generador a medida, que cumpliera con los siguientes requisitos:

- Salida del eje por ambos lados
- Geometría fácilmente acoplable al cuadro de la bicicleta diseñado
- Potencia nominal: 200-250 W, par nominal: 21 Nm, velocidad máxima: 120 rpm [5]

Por ello se decidió contactar a través del cotutor, con la Universidad de Nottingham, la cual se comprometió a fabricar este generador a medida, ya que están interesados en esta aplicación en particular.

Las restricciones geométricas que se fijaron para definir el generador son las siguientes:

Justificación de medidas del generador

En este apartado se justifican las medidas necesarias para el generador, para que así la posición de las piernas en el pedaleo fuera lo más semejante al de una bicicleta convencional.

En la siguiente figura se muestra la forma externa del generador:

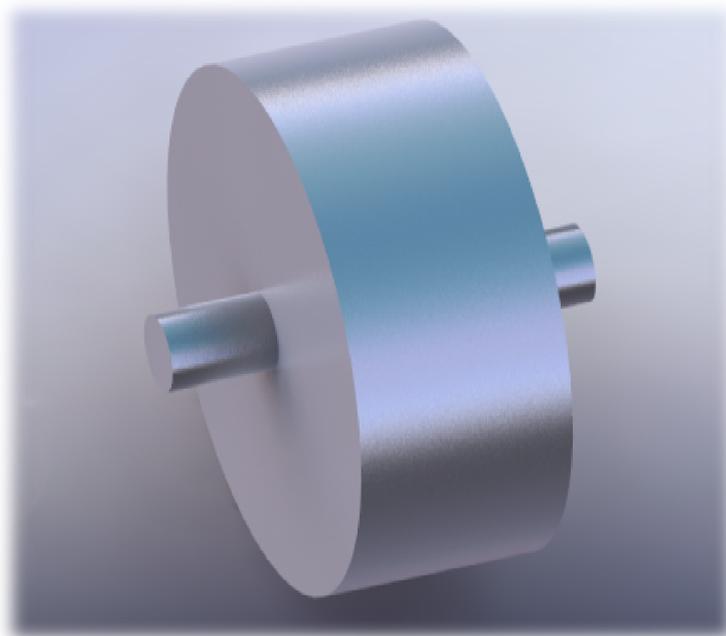


Figura 5: Geometría externa de generador eléctrico diseñado

Las medidas para la construcción del generador eléctrico de este proyecto se obtuvieron teniendo en cuenta las medidas del eje del pedalier de una bicicleta:

Las medidas a definir son las siguientes:

- Longitud del eje del generador
- Diámetro del eje del generador

- Diámetro exterior del generador
- Ancho del generador

Longitud del eje del generador

La longitud del eje del generador se obtuvo a partir de la del eje de pedalier de una bicicleta convencional, obteniendo aproximadamente 114mm, existiendo en el mercado ejes de hasta 118mm. Se ha elegido una longitud de eje de **120mm**.



Figura 6: Medición longitud eje de pedalier

Diámetro del eje del generador

El diámetro del eje del generador se obtuvo a partir de un eje de pedalier de una bicicleta convencional, existen en el mercado diferentes tipos de ejes como son de Cuadradillo o Octalink, con diámetros de 17mm y 22mm respectivamente. Se ha elegido un diámetro de eje de **25mm** para así poder adaptarse fácilmente a ambos ejes.

Diámetro exterior del generador

El diámetro exterior del generador se obtuvo tomando como referencia un plato de 44 dientes de una bicicleta convencional, este plato es el más grande de los tres y sería por tanto el más cercano a la rueda trasera, asegurándonos que no entre en contacto nunca con esta y así no modificar la geometría del cuadro de la bicicleta. El diámetro de un plato de 44 dientes es de **170mm** que ha sido la medida elegida para el diámetro exterior del generador.



Figura 7: Separación rueda-platos

Ancho del generador

El ancho del generador se obtuvo a partir del de un eje de pedaliar de una bicicleta convencional, obteniendo aproximadamente 68mm. Se ha elegido una medida de **70mm**.



Figura 8: Medición del ancho del eje pedaliar

En la siguiente tabla se muestran cada una de las dimensiones del generador:

	Min (mm)	Ideal (mm)	Max (mm)
Longitud del eje del generador	ancho generador + 50	120 (para ancho generador de 70)	ancho generador + 100
Diámetro del eje del generador	17	25	25
Diámetro exterior generador	-	170	300
Ancho de generador	-	70	100

Tabla 2: Resumen medidas generador

Nota: Todas las medidas aceptan valores intermedios entre los márgenes establecidos por los mínimos y máximos a excepción del diámetro del eje que solo puede ser 17 o 25.

Diseño del generador

Debido a las características específicas del generador requerido se ha optado diseño completo del generador el cuál se fabricara en la universidad de Nottingham. El diseño ha sido realizado por el estudiante Fernando Álvarez González como trabajo final de máster.

Todas las decisiones tomadas durante el proceso de diseño están ampliamente explicadas en su trabajo final de máster, a continuación se muestran los parámetros de la máquina eléctrica:

<i>Características principales de la máquina eléctrica</i>	
Rendimiento (%)	88.1625
Par (Nm)	18.9826
Máximo voltaje por fase (Vpico)	21.1201
Máximo flujo (Wb)	0.18453
Potencia salida (W)	198.7848
Pérdidas en el cobre (W)	25.3769
Pérdidas en el hierro (W)	1.3138
Corriente máxima (A)	8
Velocidad base (rpm)	100
<i>Dimensiones</i>	
Ranuras/Polos	24/20
Número de vueltas	40
Ángulo del imán (grados)	16.5
Espesor del imán (mm)	5
Espesor entrehierro (mm)	1
Diámetro externo (mm)	155
Diámetro rotor (mm)	95
Diámetro del eje (mm)	25
Ancho (mm)	55

Tabla 3: Características principales de la máquina eléctrica [7]

3.2 MOTOR ELÉCTRICO

El motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estátor y un rotor.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Se ha optado por adquirir un tipo de motor comercial específico para bicicletas eléctricas, denominados Hub-motor, que es un tipo de motor que va incorporado en el eje de la rueda.

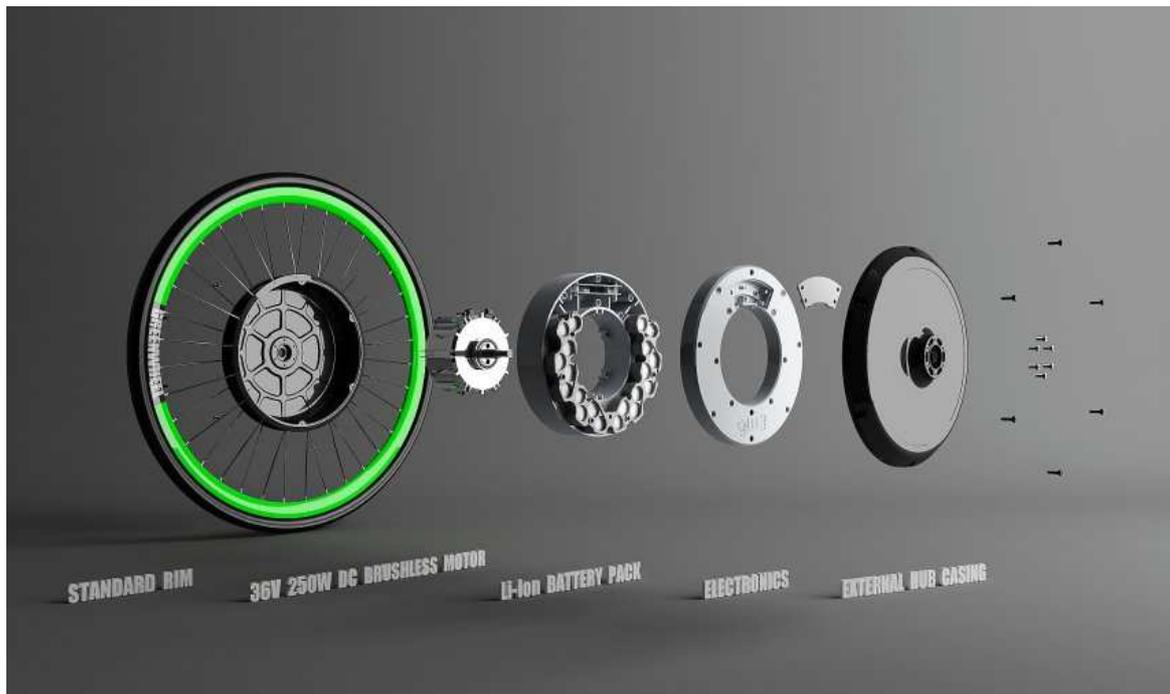


Figura 9: Explosionado motor-hub

Los hub-motor están compuestos por un reducido motor de continua que a través de una reductora consigue aumentar su par y reducir su velocidad.

Nuestros requisitos eran los siguientes [5]:

- Potencia nominal: **200-300 W**
- Par nominal: **18,37 Nm**
- Velocidad máxima: **300 rpm**

Se ha seleccionado un motor del fabricante *Golden Motor* modelo HBS36R con las siguientes características:

- Tensión alimentación: 36 V
- Potencia: 500 W
- Peso: 5 Kg

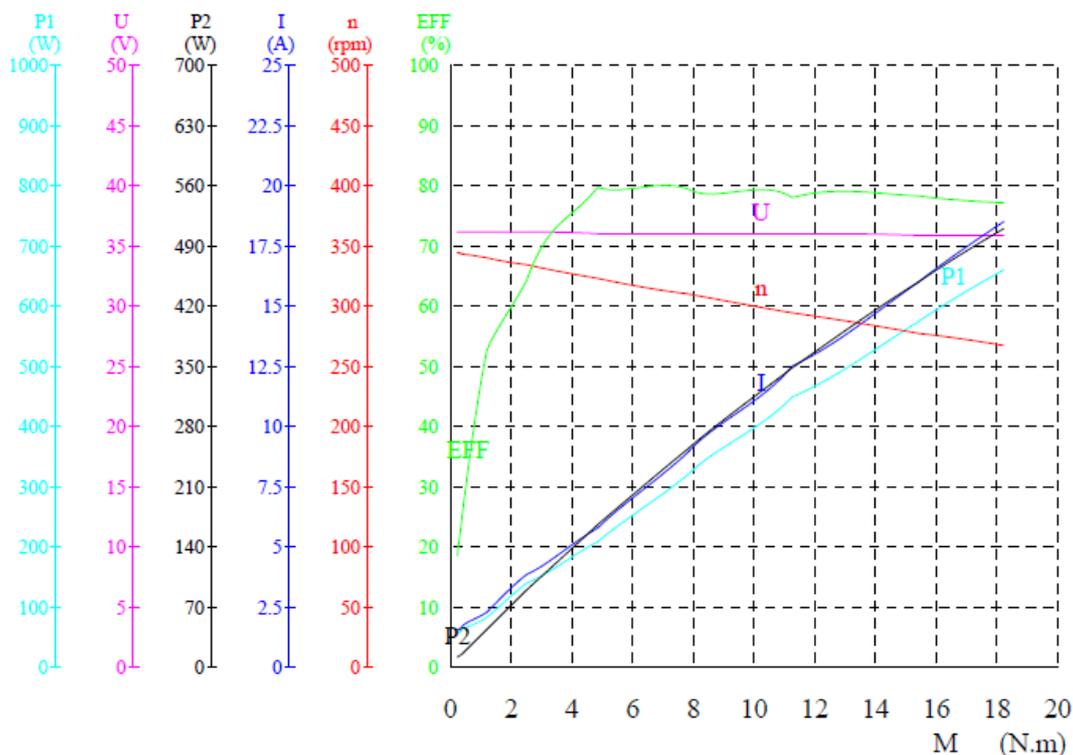


Figura 10: Gráfico características eléctricas

De esta gráfica han sido obtenidos valores aproximados, alimentando el motor a su tensión máxima recomendada de 36V se consigue una velocidad 275 rpm, un rendimiento inferior al 80%, un consumo de corriente de 18A y una potencia entorno a los 500W para así conseguir un par de 18,37Nm.

De la siguiente tabla han sido obtenidos valores más exactos, seleccionando la última fila que es la que más se aproxima a nuestro requisito de par:

No:	U	I	P1	M	n	P2	EFF
	(V)	(A)	(W)	(N.m)	(rpm)	(W)	(%)
1	36.11	1.521	54.93	0.28	343.5	10.07	18.3
2	36.11	1.504	54.32	0.28	343.0	10.05	18.5
3	36.11	1.534	55.40	0.36	343.0	12.92	23.3
4	36.10	1.706	61.60	0.44	342.4	15.77	25.6
5	36.10	1.864	67.30	0.61	341.7	21.82	32.4
6	36.10	1.935	69.89	0.86	340.9	30.69	43.9
7	36.09	2.270	81.94	1.21	339.0	42.94	52.4
8	36.09	2.532	91.38	1.44	338.2	50.98	55.7
9	36.06	3.314	119.5	2.02	335.1	70.87	59.2
10	36.05	3.829	138.0	2.54	333.5	88.69	64.2
11	36.04	4.231	152.5	3.29	329.4	113.4	74.3
12	36.01	5.016	180.6	3.89	326.6	133.0	73.6
13	36.00	5.731	206.3	4.87	321.9	164.1	79.5
14	35.97	6.746	242.6	5.69	318.2	189.5	78.1
15	35.94	7.715	277.3	6.88	312.6	225.1	81.1
16	35.92	8.870	318.6	7.83	308.7	253.0	79.4
17	35.90	10.16	364.8	8.78	304.8	280.1	76.7
18	35.90	10.92	392.4	10.24	298.3	319.8	81.4
19	35.88	12.44	446.4	11.28	294.2	347.4	77.8
20	35.87	13.42	481.6	12.80	287.7	385.5	80.0
21	35.86	14.64	525.0	13.89	283.5	412.2	78.5
22	35.83	15.99	573.1	15.46	276.7	447.8	78.1
23	35.81	17.11	612.9	16.61	273.1	474.9	77.4
24	35.78	18.43	659.7	18.24	266.1	508.1	77.0

Tabla 4: Datos ensayos motor-hub

Dando por buena la selección de este motor, aunque se obtenga algo menos de la velocidad necesaria (266 rpm frente a los 300 rpm requeridos) y el rendimiento sea solo del 77%.



Figura 11: Motor-hub

3.3 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El sistema de almacenamiento de energía es un sistema KERS (Kinetic Energy Recovery System) necesario para la recuperación de energía durante el proceso de frenado.

El sistema de almacenamiento de energía es necesario también debido a que la producción de energía eléctrica a través del generador no es completamente instantánea al inicio, por lo que, se necesita acelerar la bicicleta mínimamente al inicio del pedaleo para dotar de estabilidad al ciclista para pedalear.

El KERS estará formado principalmente por varios super-condensadores y un convertidor de potencia que nos permitirá controlar el flujo de energía.

Los super-condensadores están fabricados por Maxwell Technologies y sus características se muestran a continuación.

BMOD0058 E016 B02	
Tensión nominal (V)	16
Corriente nominal (A)	170
Capacidad (F)	58
Número de celdas	6
Configuración	Serie
Energía Almacenada (Wh)	2.1
Peso (Kg)	0.63
Vida útil (años)	4

Tabla 5: Características del convertidor



Figura 12: Super-condensador utilizado

3.4 ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y CONTROL

Tanto el sistema eléctrico de potencia como las estrategias de control han sido principalmente diseñadas por Enrique Rodríguez Díaz como su trabajo final de máster. A continuación se describe las partes que conforman el sistema eléctrico de potencia.

Toda la electrónica de potencia necesaria para controlar el flujo de potencia del ciclista a las ruedas se diseñará para estar integrada en una misma PCB.

La electrónica de potencia estará formada por las siguientes partes:

- Un convertidor de potencia será el encargado de controlar la potencia entregada por el generador. El generador se utilizará en un solo cuadrante de funcionamiento debido a que el ciclista solo pedalea en una dirección y el generador siempre ofrece resistencia en el mismo sentido. La topología elegida para el convertidor es de tipo Boost, ya que nos permite operar de dicha manera con una topología muy simple.

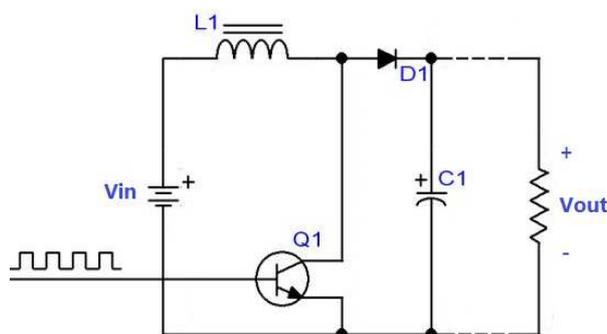


Figura 13: Esquema convertidor Boost

El convertidor Boost (o elevador) es un convertidor DC a DC que obtiene a su salida una tensión continua mayor que a su entrada.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores (diodo y transistor), y al menos un elemento para almacenar energía (condensador, bobina o combinación de ambos). Frecuentemente se añaden filtros contruidos con inductores y condensadores para mejorar el rendimiento.

- El motor estará controlado por un segundo convertidor de potencia, la topología utilizada será en puente completo de tres fases. Este convertidor no fue diseñado si no que se utilizó uno comercial que cumplía con los requisitos. El convertidor usado es un DRV8332 del fabricante Texas Instrument. A continuación se muestra un esquema simplificado del convertidor:

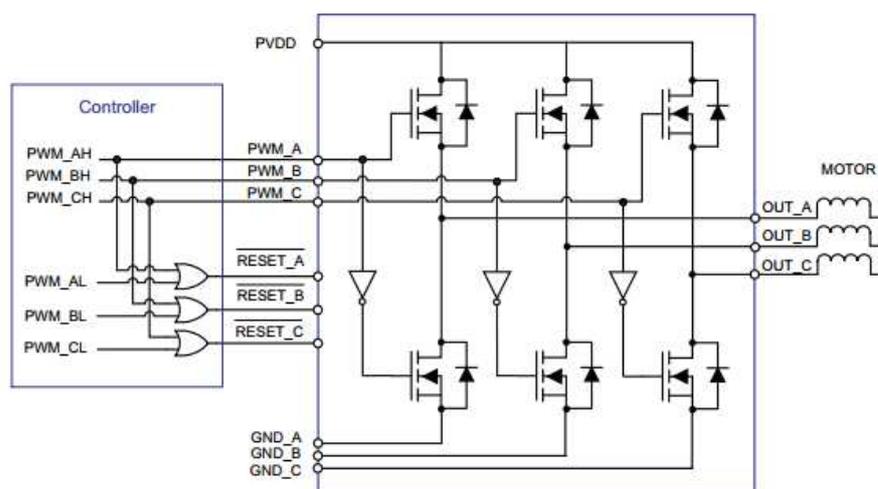


Figura 14: Esquema simplificado del DRV8332

- Un tercer convertidor de potencia será necesario para controlar el flujo de energía del KERS. La topología utilizada es un DAB (Dual Active Bridge), este convertidor está formado por dos puentes completos en H conectados a través de un transformador. Se ha optado por esta topología debido a que nos permite tanto ceder como almacenar energía en los super-condensadores, a la vez que, nos proporciona aislamiento gracias al transformador. El transformador también nos permite adaptar más fácilmente las tensiones de entrada y de salida del convertidor, ya que, la tensión nominal de los super-condensadores es de 16V y la tensión del bus de continúa es de 36V. A continuación se muestra un esquema simplificado del convertidor:

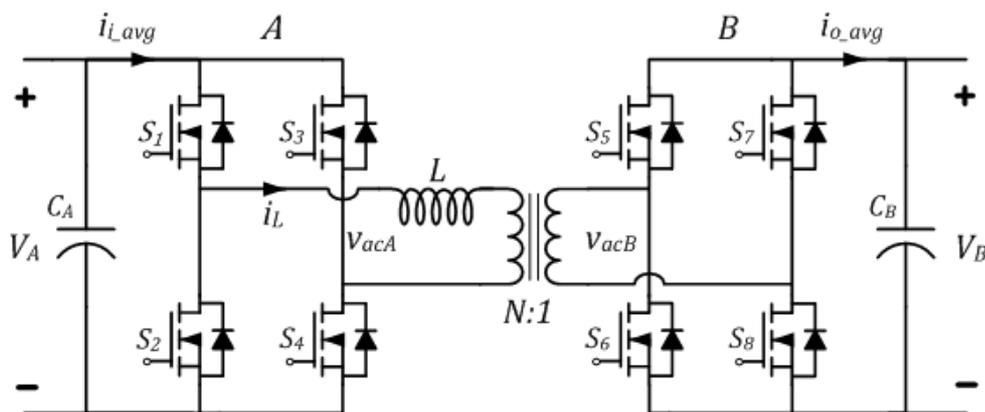


Figura 15: Esquema convertidor DAB

Las estrategias de control que se implementarán se detallan a continuación:

- El generador estará controlado en par, mediante el convertidor Boost. El par ofrecido por el generador se obtiene mediante el control de la corriente que fluye a través de la bobina del convertidor. Esta estrategia de control nos permite implementar fácilmente el sistema de marchas de la bicicleta, ya que, aumentando el par ofrecido por el generador aumentamos la potencia generada por el ciclista y por tanto la potencia desarrollada por el motor.

Cada marcha estará asociada a un valor de par específico, por lo que una vez que el ciclista desee aumentar la velocidad de la bicicleta cambiará de marcha para desarrollar más potencia y acelerar la bicicleta.

- El motor estará controlado mediante dos estrategias de control diferentes, una que se utilizará únicamente en las frenadas y la otra durante el resto de la actividad de la bicicleta. Durante las frenadas se controlará el par resistivo ofrecido por el motor, lo que nos permite controlar la potencia de frenada. En este proceso la energía generada por el motor se almacenará en los super-condensadores.

Mientras no se active el sistema de frenado la estrategia de control utilizada será un control de tensión. El motor será el encargado de regular la tensión del bus de continua por encima de 36V.

- Los super-condensadores estarán controlados en corriente, inyectando corriente en el bus de continua durante el inicio del pedaleo para mover la bicicleta y extrayendo corriente del bus durante las frenadas.

4. DISEÑO MECÁNICO

4.1 SELECCIÓN DE MATERIAL

Para establecer el material en el que diseñar y fabricar el cuadro de la bicicleta se establecieron unos requisitos generales:

- Baja densidad, que permita un peso final reducido, aumentando así la manejabilidad de la bicicleta
- Propiedades mecánicas adecuadas a su aplicación, debido a las sollicitaciones a las que va a estar expuesto, tanto límite elástico, como tenacidad y resistencia a fatiga
- Facilidad de obtener y conformar el material, para facilitar la producción del cuadro de la bicicleta

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Muchos cuadros de bicicletas siguen fabricándose en acero, debido a que las aleaciones de este material permiten lograr unas buenas propiedades mecánicas, destacando su reducido coste, aunque debido a su alta densidad han ido quedando en desuso, aplicándolo únicamente en bicicletas de bajo presupuesto o con aleaciones cuyo precio ya no resulta tan favorable. No obstante, sigue siendo una buena alternativa.

Actualmente predominan más otras alternativas como son el aluminio, titanio, carbono o kevlar. Estos materiales poseen la ventaja de su reducida densidad en comparación con el acero, aunque debido a ello se necesita más cantidad de material para las mismas sollicitaciones, y la reducción total de peso no sea tan favorable como puede parecer en un primer momento.

El elevado precio de estos materiales, con excepción del aluminio, hace que su uso quede restringido a bicicletas de competición, no utilizándose para productos destinados al usuario medio. De modo que son descartados y la elección dejando como únicas opciones el acero y el aluminio ya que se ajustan más a la aplicación a la que va dirigida esta bicicleta.

Para analizar qué tipo de material se adapta mejor al diseño de nuestro cuadro, se ha recurrido a los mapas de Ashby.

Según esta metodología, existe un parámetro de rendimiento P que puede permitir la optimización del proceso de diseño de un componente dado. Dicho parámetro o índice de rendimiento depende de la forma del componente, de su función y las exigencias físicas a las cuales se encuentre sometido.

Se han tenido en cuenta los siguientes materiales para su análisis mediante dichos mapas.

- Acero
- Aleación de Al
- Aleación de Ti
- Aleación de Mg
- CFRP (Polímero reforzado con fibra de carbono).

Los requisitos que el material debe cumplir:

- Ser rígido
- Ser resistente a la torsión
- Ser resistente a fatiga
- Ser ligero
- Soportar impactos
- Resistente a la corrosión
- Bajo coste

A continuación se muestra cada uno de los distintos mapas de Ashby utilizados:

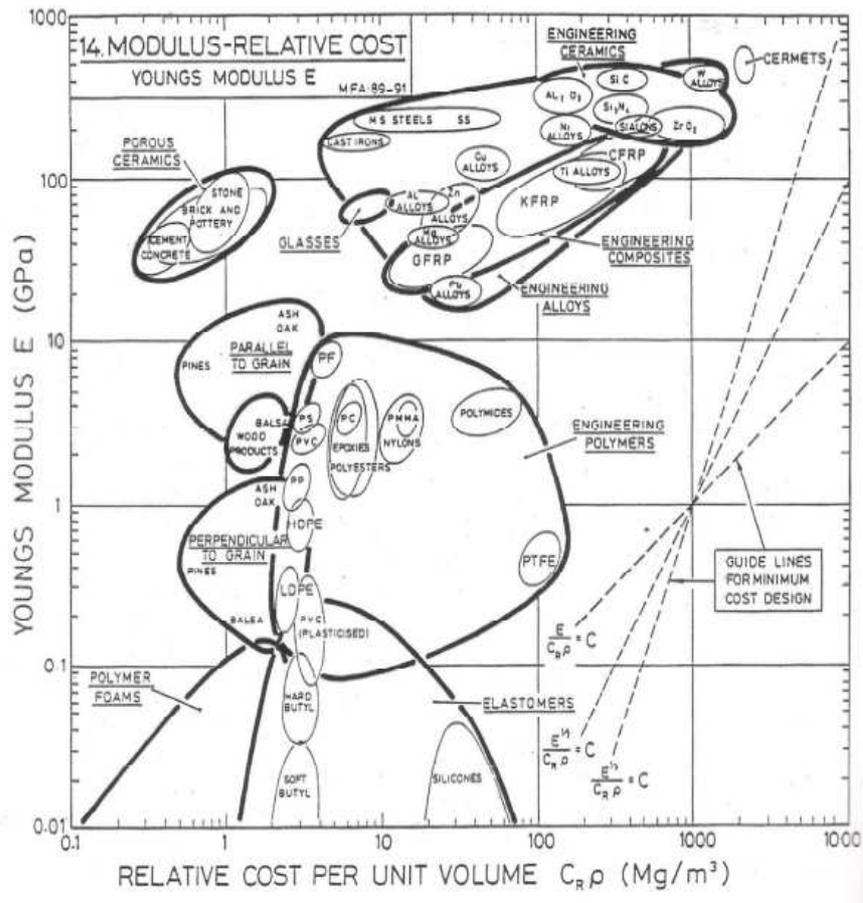


Figura 18: Mapa de selección de materiales 14: Mínimo coste para una resistencia dada [6]

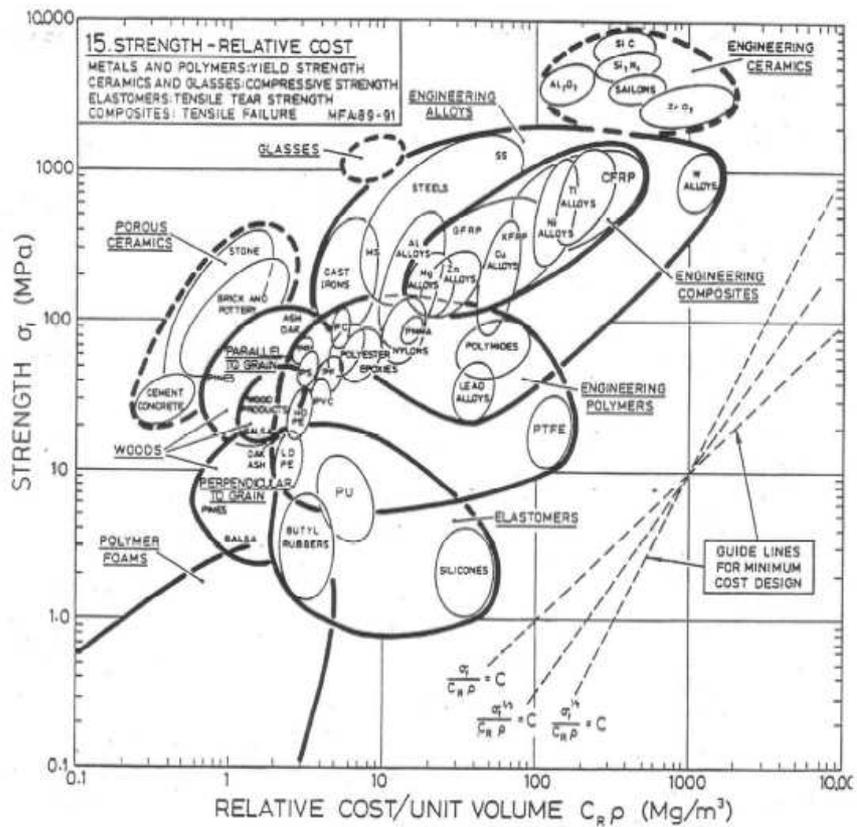


Figura 19: Mapa de selección de materiales 15. Mínimo coste para una rigidez dada [6]

Analizando los materiales en los mapas de selección obtenemos la siguiente tabla:

MATERIAL	Sin considerar coste		Considerando coste	
	$E^{(1/2)} / \rho$	$\sigma^{(1/2)} / \rho$	$E^{(1/2)} / \rho c$	$E^{(1/2)} / \rho c$
<i>Acero aleado</i>	5	5	1	1
<i>Aleación de aluminio</i>	3	3	2	2
<i>Aleación de titanio</i>	4	4	4	4
<i>Aleación Magnesio</i>	2	2	3	3
<i>CFRP</i>	1	1	5	5

Tabla 6: Ponderación de materiales

Se numeran del 1 al 5, siendo 1 el que mejores propiedades tiene y 5 el que peores.

La conclusión ha sido que por sus propiedades mecánicas el CFRP sería la mejor opción, sin embargo ha sido descartado por su alto coste.

La aleación de Al tiene peores propiedades mecánicas que la aleación de Mg pero tiene un coste menor, por lo que es la mejor opción en relación calidad-precio.

Es importante, también, analizar los aceros, ya que a pesar de que el aluminio parezca que se adapta mejor, debido a la amplia gama de ambos materiales puede existir una opción adecuada.

Aluminios

Existen diferentes tipos y calidades de aluminio. Los típicamente utilizados para bicicletas son las aleaciones 6061 (aleación con magnesio) y 7005 (aleación con zinc).

Ambos tienen buenas propiedades mecánicas y son aluminios de gran calidad, aunque el 7005 tiene una resistencia a la fatiga ligeramente superior. El comportamiento de ambas aleaciones es muy similar, con una ligerísima ventaja de propiedades mecánicas a favor del 7005.

Es por esto que, entre estos dos materiales, decantarse por uno u otro ha estado más ligado a la disponibilidad, stocks, o instalaciones de la empresa, ya que el precio de ambos es también muy similar.

A pesar de sus buenas propiedades mecánicas, estas disminuyen aproximadamente un 30% con altas temperaturas, y si se realizan soldaduras estas zonas podrían quedar debilitadas. Para solucionarlo, y aunque no es necesario, puede recurrirse a un tratamiento térmico posterior que permita recuperar las características iniciales.

El tratamiento térmico que se suele asociar a estos materiales es el denominado T6, que es un tratamiento de solubilización en caliente y envejecimiento artificial. Este tratamiento se aplica después de soldar y alinear el cuadro, por lo que también sirve para eliminar las tensiones creadas durante la fabricación y que podrían dar lugar a fallos prematuros.

Aceros

En cuanto al acero, la gama de tipos y calidades es mucho más amplia. Entre las aleaciones más conocidas y utilizadas en bicicletas podemos destacar el Cromoly o 4130 (aleación de cromo-molibdeno), fácilmente conformable.

Una ventaja del acero sobre el aluminio es que conserva durante más tiempo sus propiedades mecánicas. El aluminio pierde rigidez con el paso del tiempo, lo que implica una pérdida de energía en el pedaleo que no se traduce en desplazamiento (aspecto más importante en bicicletas de competición que en una bicicleta de paseo).

El punto débil del acero, a excepción de su densidad, es su exposición a la corrosión, aunque por supuesto existe el acero inoxidable que minimiza este problema.

Otra ventaja del acero es su facilidad para repararlo, el aluminio requiere técnicas de soldadura más sofisticadas y difíciles de emplear como es la soldadura TIG pulsada. De todas formas, un cuadro de calidad ya sea de acero o de aluminio no suele tener problemas de rotura, aunque si hay que tener en cuenta los métodos de soldadura durante su producción. En cuanto a cuestiones de reciclaje, ninguno destaca respecto del otro, aunque es más caro el reciclaje del aluminio.

Resumiendo las ventajas y desventajas de cada uno de ellos:

Acero:

- Buenas propiedades mecánicas
- Estabilidad de propiedades
- Menor resistencia a corrosión
- Precio inferior
- Más difícil de mecanizar
- Fácil de reparar

Aluminio:

- Buenas propiedades mecánicas, pero no tanto como el acero
- Perdida de propiedades con el tiempo
- Mayor resistencia a corrosión
- Mas difícil de soldar y reparar
- Precio más elevado
- Más fácil de mecanizar

En la siguiente tabla se muestran las características mecánicas:

Propiedad	Aleación 6061	Acero aleado	Unidades
Módulo elástico	6.9e+10	2.1e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	0.28	N/D
Módulo cortante	2.6e+10	7.9e+10	N/m ²
Densidad	2700	7700	kg/m ³
Límite de tracción	1,25e+8	7,24e+8	N/m ²
Límite elástico	5,50e+7	6,20e+8	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	2.4e-5	1.3e-5	/K

Tabla 7: Características mecánicas de Aleación 6061 y Acero aleado

A continuación se hace una breve explicación de cada propiedad:

- **El módulo elástico o también llamado módulo de Young:** es un parámetro que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria producidos. El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material: cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad.
- **Coefficiente de Poisson:** es un parámetro que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en la dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo, estando relacionado con el mantenimiento del volumen del material.
- **El módulo cortante:** es un parámetro que indica la relación existente entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo donde las fuerzas son paralelas al área del material (a diferencia del ensayo a tracción donde son perpendiculares) y los incrementos de deformación unitaria producidos.
- **Densidad:** es un parámetro que indica cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado, es la cantidad de masa por unidad de volumen.
- **Límite de tracción o tensión de rotura:** es la máxima tensión que un material puede soportar al ser traccionado antes de que la sección transversal de la probeta usada en el ensayo se comience a contraer de manera significativa.
- **Límite elástico:** es la tensión a partir de la cual las deformaciones en el material dejan de ser reversibles, es decir, el material no recupera su forma inicial.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

- **Coefficiente de expansión térmica o de dilatación:** es un parámetro que indica el cambio de dimensión de un sólido, por unidad de longitud y por grado centígrado (o absoluto) de temperatura.

A pesar de que para lograr la misma resistencia necesitaremos casi el doble de material de aluminio que de acero, la densidad de este último es casi tres veces mayor, por lo que la ganancia en cuanto a ligereza final del cuadro se refiere sigue siendo notable.

Debido a su mayor resistencia frente a la corrosión, y a su menor densidad hace decantarnos por el aluminio, viable en cualquiera de las dos aleaciones analizadas aunque ha sido elegida la aleación 6061 por ser más común.

4.2 DISEÑO DEL BASTIDOR

El diseño del bastidor de la bicicleta ha sido realizado mediante Solidworks 2012, que es un software de diseño CAD en 3D.

Para comenzar con el diseño del bastidor el primer pasó ha sido establecer la geometría de la bicicleta: longitud de barras y los ángulos establecidos entre ellas. Para ello se ha utilizado como referencia la geometría de una bicicleta comercial.

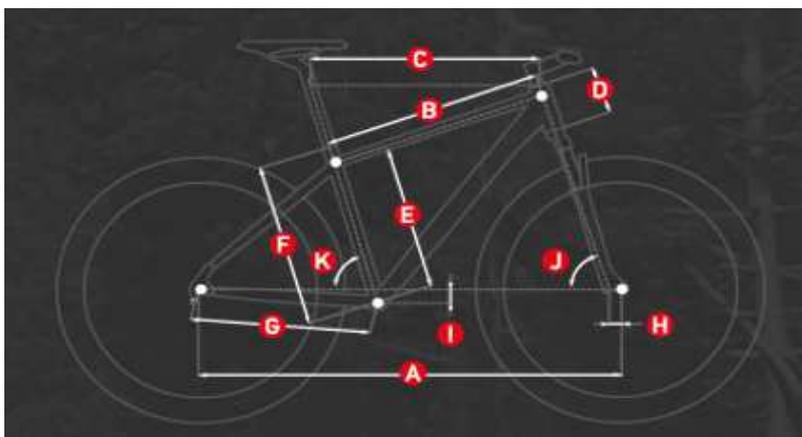


Figura 20: Geometría cuadro bicicleta

Obteniendo las medidas de la siguiente tabla:

	S	M	L	XL
A	1040	1055	1070	1090
B	537	549	560	580
C	550	570	585	605
D	105	115	125	140
E	331	382	433	488
F	381	432	483	538
G	435	435	435	435
H	42	42	42	42
I	45	45	45	45
J	70.5°	71°	71°	71°
K	73°	73°	73°	73°
R	370	387	399	415
S	587	600	608	622

Tabla 8: Medidas cuadro bicicleta

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Se ha seleccionado una talla M para que la bicicleta sea utilizada por un grupo de usuarios mayor.

Inicialmente y con el objetivo de hacer un prototipo no funcional, se estableció la madera como el material en el que diseñar el bastidor, sin entrar a valorar las características de otros materiales para así facilitar la fabricación del bastidor, se decidió utilizar planchas de madera de diferentes grosores sobre los que se estamparía la silueta del bastidor y de los diferentes componentes que serían recortados mediante una sierra eléctrica vertical.

Las ventajas e inconvenientes del uso de este material fueron los siguientes:

Ventajas

- Bajo coste del material
- Bajo coste de fabricación
- Tiempo de fabricación reducido
- Posibilidad de fabricación por parte del proyectante

Desventajas

- Baja resistencia del material
- Limitación de formas en el diseño

Se identificaron los componentes que establecerían las distancias más críticas en el diseño del cuadro:

- Diámetro interior dirección para horquilla delantera, 34mm
- Diámetro del tubo de la tija del sillín, 27,2mm
- Longitud del eje de pedalier
- Ancho del motor-hub de la rueda trasera,

Teniendo en cuenta estas medidas y las de los componentes comerciales que se deben añadir al bastidor como son:

- Horquilla delantera
- Ruedas de 26"
- Tija sillín
- Sillín
- Manillar
- Potencia
- Bielas
- Pedales
- Cubiertas

- Generador eléctrico
- Motor-hub trasero

Se obtuvo el primer diseño del cuadro realizado en madera:



Figura 21: Primer diseño de cuadro en madera

El bastidor estaba compuesto por dos planchas simétricas de madera con sus correspondientes vaciados para reducir peso y por cuatro piezas realizadas en aluminio para establecer las conexiones mecánicas con los distintos componentes comerciales.

Una pieza colocada en la parte frontal cumpliría la función de colocar la dirección de la horquilla y de fijar las dos planchas de madera mediante cuatro tornillos en cada una de sus dos caras en contacto, que realizaban un apriete mediante una placa de metal de reducido espesor contra la madera.

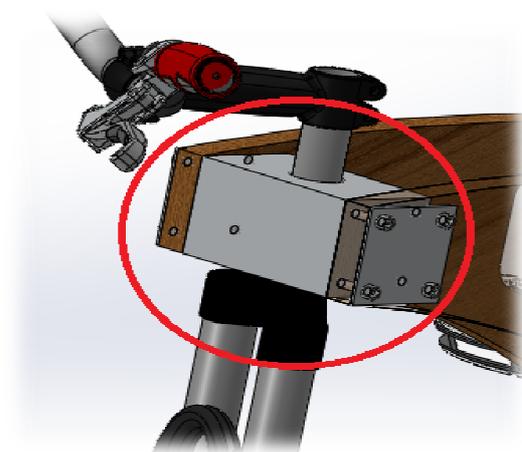


Figura 22: Pipa de primer diseño

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Otra pieza colocada en la parte trasera cumpliría la función de poder colocar la rueda trasera en el bastidor, esta se unía mediante tres tornillos a la plancha de madera. El bastidor constaba de una pieza gemela en la otra cara para realizar la misma función.

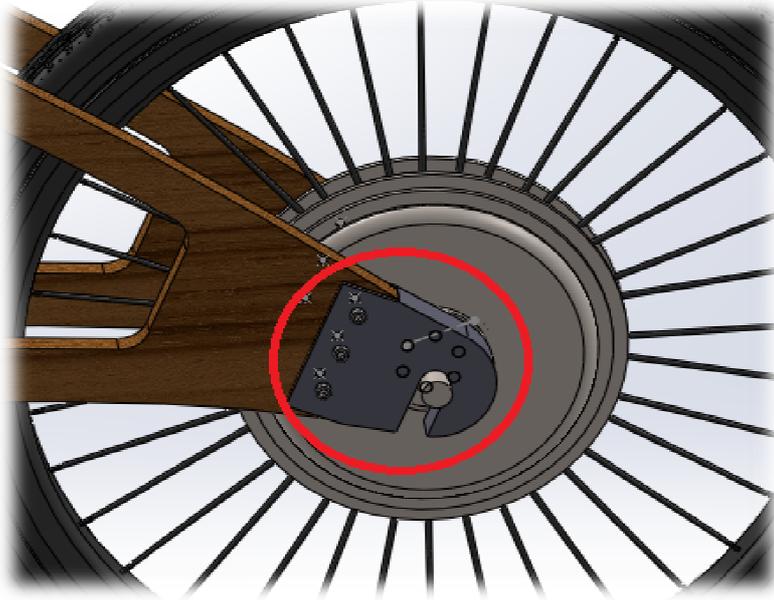


Figura 23: Anclaje rueda trasera de primer diseño

La pieza restante situada en la zona intermedia cumpliría la función de unir las dos planchas laterales de madera, darle rigidez al bastidor y a su vez poder acoplar el sillín. Esta se conectaría mediante cuatro tornillos que presionarían una plancha contra la madera.

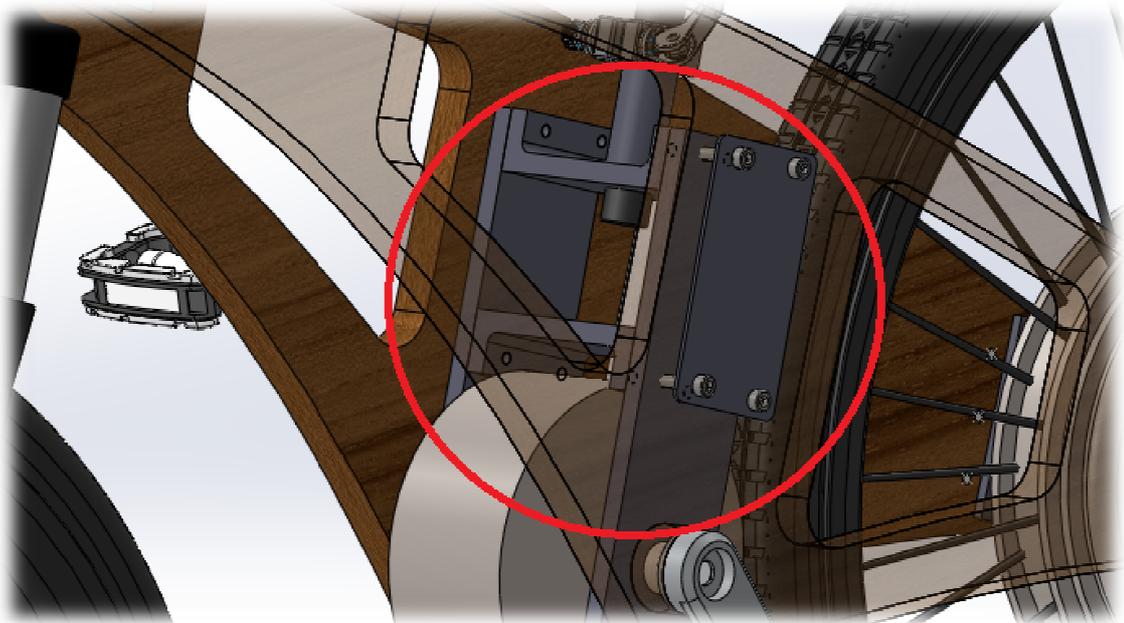


Figura 24: Soporte intermedio de primer diseño

Finalmente la opción de fabricar el bastidor en madera se desechó ya que el intentar acoplar componentes de distintos materiales como son madera y metal conllevaría problemas en los

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

ajustes de las piezas en contacto entre sí, ya que la madera es fácilmente alterable por condiciones ambientales como humedad, la temperatura, variando así su grosor provocando un juego entre las piezas.

La resistencia del material ha sido también un problema ya que debería soportar el peso del ciclista y del equipamiento electrónico. Aunque el motivo que ha descartado esta opción ha sido que obligaba a llevar la distancia trasera entre planchas (debido al grosor del motor-hub) por todo el bastidor, haciendo que resultara muy incomodo montar en ella ya que provocaría una gran separación entre los pedales.

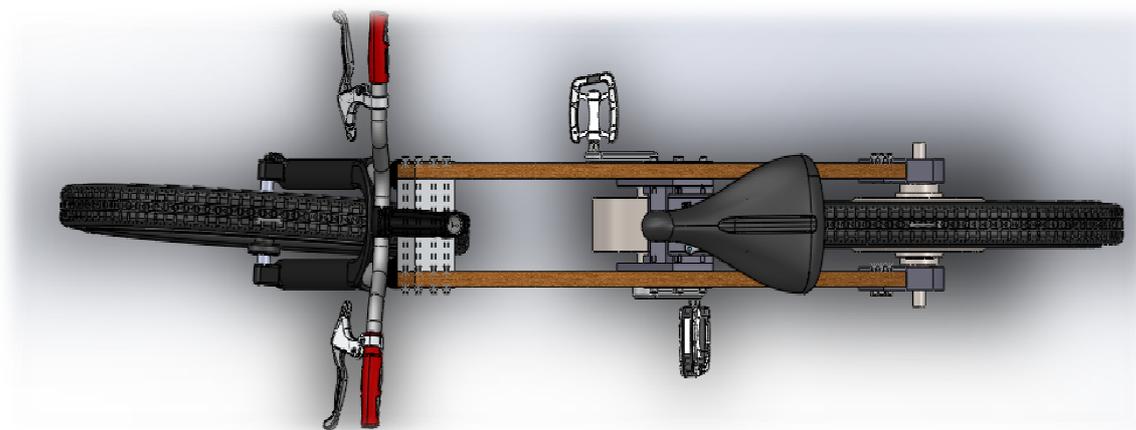


Figura 25: Vista superior de primer diseño en madera

Finalmente se ha decidido realizar el bastidor en metal lo que soluciona el problema del ajuste entre los componentes, obteniendo un segundo modelo no definitivo del cuadro de la bicicleta.

Este segundo modelo de cuadro está formado por cuatro piezas cuyas funciones son:

- **Cuerpo central o bastidor:** Sirve de nexo de todas las diferentes partes que forman el cuadro, pudiendo colocar en el elementos como son: el sillín, el generador, electrónica de potencia.
- **Dos brazos traseros gemelos:** Solucionan problema del modelo anterior de separación de los pedales debido a tener que llevar la distancia trasera provocada por el motor, por todo el cuadro, también cumplen la función de sujetar la rueda al conjunto.
- **Sujeción de la horquilla o pipa:** Permite colocar la horquilla de la rueda delantera en el cuadro.

Este segundo diseño es el que se muestra a continuación, no se ofrecen más detalles de este modelo ya que no fue el definitivo:



Figura 26: Segundo diseño de cuadro

Finalmente se obtuvo el tercer y definitivo diseño.

El conjunto cuadro de la bicicleta está formado por seis piezas que se detallan a continuación:

Bastidor o cuerpo central



Figura 27: Bastidor de diseño definitivo

Como en el modelo anterior su función es de servir de nexo de las diferentes piezas que conforman el cuadro y poder instalar en el partes como: generador, sillín y electrónica de potencia.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

En su parte delantera consta de tres agujeros roscados para tornillos de M6, para poder instalar el conjunto de la pipa que sujeta la horquilla:



Figura 28: Roscados para tija de bastidor definitivo

En su parte trasera consta de dos agujeros roscados para tornillos de M6, para poder instalar una pieza intermedia que une los brazos traseros a esta pieza:



Figura 29: Roscados para unión trasera de bastidor definitivo

Esta pieza también incluye un orificio para poder colocar el sillín mediante un pasador.



Figura 30: Anclaje para sillín de bastidor definitivo

La parte inferior ha sido diseñada para poder adaptar el generador que ira colocado a la misma altura que el eje del pedaliar de una bicicleta convencional, y así que este quede situado a una distancia óptima para el pedaleo.



Figura 31: Zona de asiento para el generador eléctrico

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Esta pieza tiene un peso de 3,62Kg, el material utilizado es una aleación 6061 de 30mm de espesor, este grosor de chapa es debido a que en él hay que instalar el tubo del sillín que tiene un diámetro de 27,20mm y además es necesario para soportar los esfuerzos a los que sea sometido.

Pipa o sujeción de la horquilla



Figura 32: Sujeción de la horquilla definitivo

Es un conjunto formado por dos piezas simétricas que se atornillan entre sí mediante dos tornillos situados en la zona central de la pieza de M4, estando el roscado de estos en la pieza de la derecha. Los otros tres agujeros restantes son para acoplar el conjunto al bastidor que no son roscados.

Al unirse ambas piezas forman una circunferencia de diámetro 34mm para poder acoplar la dirección de la bicicleta que incluye los rodamientos, este elemento es comercial y es necesario para poder hacer girar la horquilla y acoplarla al cuadro de la bicicleta.

Esta pieza tiene un peso de 0,77Kg, el material utilizado es una aleación 6061.

La dirección se muestra en la siguiente figura:



Figura 33: Dirección bicicleta comercial

Unión Bastidor-Brazos traseros



Figura 34: Unión trasera definitiva

Esta pieza cumple la función de unir los dos brazos traseros con el bastidor. Se unen a ellas mediante los tres agujeros roscados laterales. Esta pieza es unida mediante dos tornillos que se colocan por la parte superior de esta pieza, roscando en el bastidor. Todos los tornillos son de M6.

El peso de esta pieza es de 0,77Kg, el material utilizado es una aleación 6061 de 30mm de espesor.

Brazo trasero



Figura 35: Brazo trasero definitivo

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Esta pieza cumple la función sujetar la rueda trasera y unirla al resto del conjunto. Se une al bastidor mediante la pieza anteriormente descrita a través de los tres tornillos de M6 que se observan en la anterior imagen.

El peso de esta pieza es de 0,57Kg, se dispone de otra pieza gemela a esta. El material utilizado es una aleación 6061 de 15mm de espesor.

El conjunto final formador por las seis piezas es el siguiente:



Figura 36: Conjunto definitivo de cuadro

El conjunto de las seis piezas es unido entre sí mediante tornillos de M6, el peso total del cuadro es de **6,3 Kg** utilizando como material la aleación 6061.

La geometría del cuadro es la siguiente:

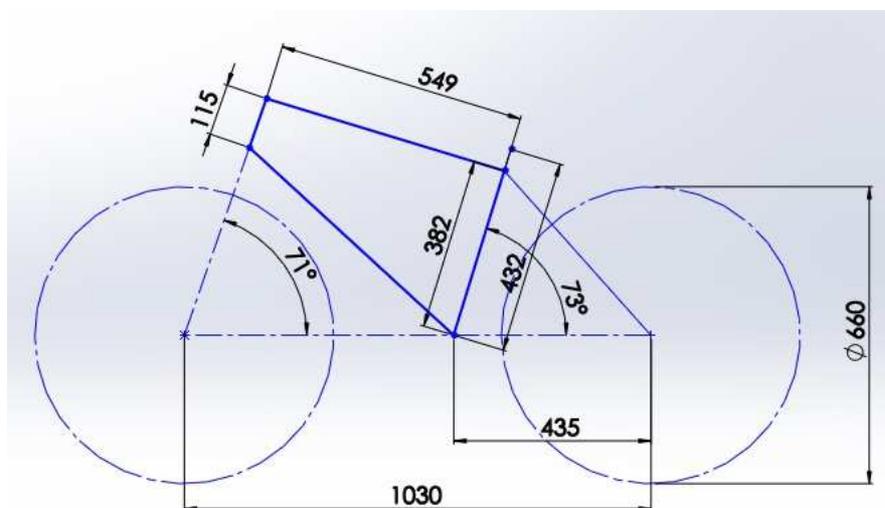


Figura 37: Geometría de cuadro diseñado

4.3 CÁLCULO DE UNIONES ATORNILLADAS

El bastidor de la bicicleta está formado por varias piezas que están unidas entre sí mediante tornillos formando uniones atornilladas.

A continuación se ha realizado el cálculo de los tornillos instalados en el bastidor. Se han realizado los cálculos para dos tipos de métricas: M4 y M6 ambos de calidad 8.8

Hay que tener en cuenta unas reglas básicas de posicionamiento de los agujeros de los tornillos.

Distancia a los bordes

Se establecen las distancias mínimas para posicionar el centro de los tornillos como se muestran en la siguiente figura:

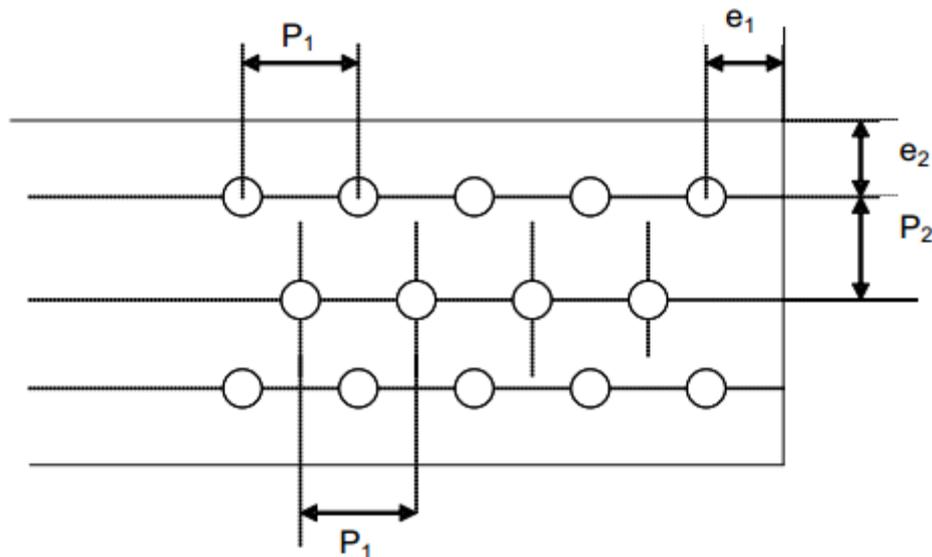


Figura 38: Distancias mínimas entre agujeros y bordes

La distancia e_1 desde el centro del agujero al extremo frontal según la dirección de la transmisión de la carga debe ser al menos de:

$$e_1 \geq 1,2 \cdot d_0$$

- d_0 = diámetro del agujero, **5mm** para M4, **7mm** para M6 (Diámetro vástago más holgura nominal de 1mm)

Obteniendo:

$$e_{1, M4} \geq 6\text{mm}$$

$$e_{1, M6} \geq 8,4\text{mm}$$

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

La distancia e_2 del centro del agujero al borde lateral medida normalmente a la dirección de la transmisión de la carga debe ser al menos de:

$$e_2 \geq 1,5 \cdot d_0$$

Obteniendo:

$$e_{2, M4} \geq 7,5\text{mm}$$

$$e_{2, M6} \geq 10,5\text{mm}$$

Separación entre agujeros

La distancia p_1 entre centros de tornillos en la dirección de la transmisión de la carga debe ser al menos de:

$$p_1 \geq 2,2 \cdot d_0$$

Obteniendo:

$$p_{1, M4} \geq 11\text{mm}$$

$$p_{1, M6} \geq 15,4\text{mm}$$

La separación p_2 entre filas de tornillos, medidos perpendicularmente a la dirección de la transmisión de la carga debe ser al menos de:

$$p_2 \geq 3,0 \cdot d_0$$

Obteniendo:

$$p_{2, M4} \geq 15\text{mm}$$

$$p_{2, M6} \geq 21\text{mm}$$

Cálculo de fuerzas resultantes en los tornillos mediante Solidworks

Para poder tratar a todos los componentes por lo que está formado el bastidor como un solo conjunto y aplicarle los distintos ensayos hay que comprobar previamente que los tornillos que establecen las uniones soportan los esfuerzos a los que están sometidos.

Para realizar el análisis de los tornillos se debe establecer los contactos entre componentes del tipo "sin penetración" es decir que se pueden desplazar pero sin interferir unos componentes con otros.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Sería un error establecer en el software una unión tipo "Unión rígida/Sin espacio libre" ya que el software tomaría todos los componentes como uno solo sin tener en cuenta las uniones entre ellos, por lo que los tornillos no estarían sometidos a esfuerzos.

Los pasos a proceder fueron los siguientes:

Crear un ensamblaje de todas las piezas que forman el conjunto del bastidor. Se ha añadido una horquilla rígida modelada de geometría más sencilla para agilizar los cálculos de elementos finitos.



Figura 39: Horquilla simplificada

El uso de la horquilla ha sido indispensable para poder situar en ella una de las dos sujeciones del conjunto para en análisis. El que esta horquilla haya sido de una geometría diferente a la real no influye en nuestros cálculos ya que los datos de tensiones que se requieren son únicamente del bastidor que ha sido el componente a diseñar.

A continuación se muestra el conjunto a simular:

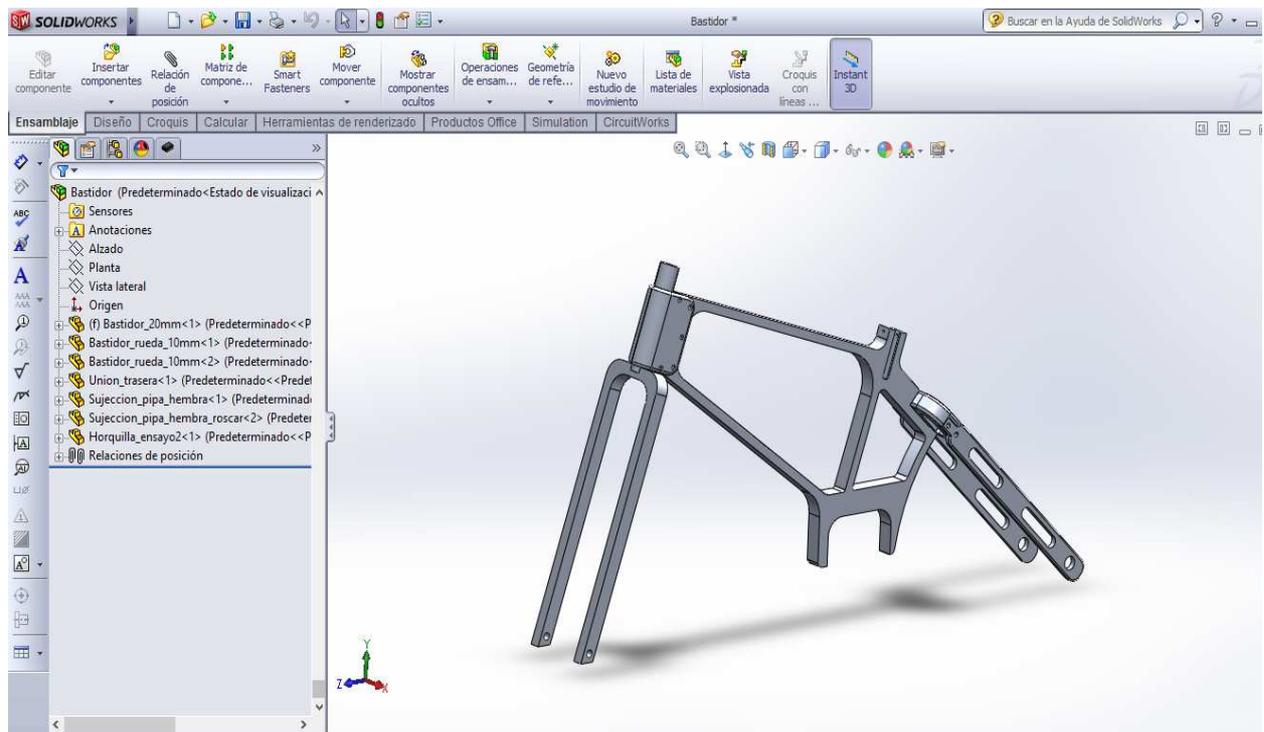


Figura 40: Ensamblaje para simulación de uniones atornilladas

El siguiente paso es iniciar el complemento de Solidworks "Simulation" y seleccionar un estudio estático:

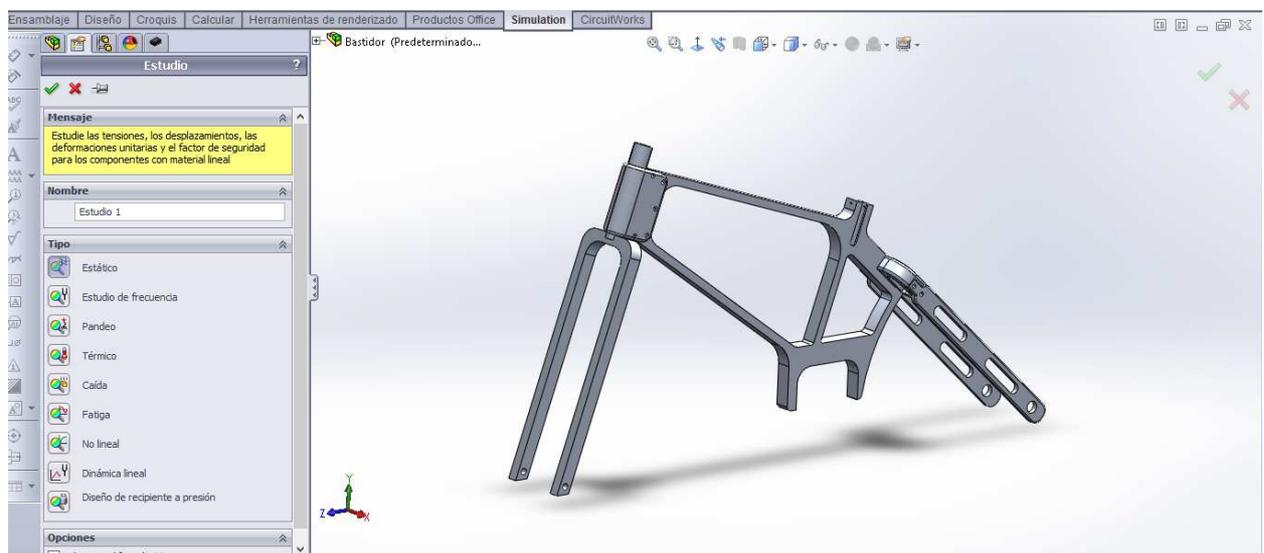


Figura 41: Menú selección de análisis

Se sitúan las fuerzas a las que ha sido sometido el bastidor en el ensayo:

- Fuerza ejercida por el peso del ciclista en el sillín, 1200N
- Fuerza ejercida por la gravedad

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

La primera fuerza ha sido establecida como carga remota, para configurarla se debe seleccionar en el menú de "Cargas externas" la opción de "Carga/masa remota" realizando la siguiente configuración:

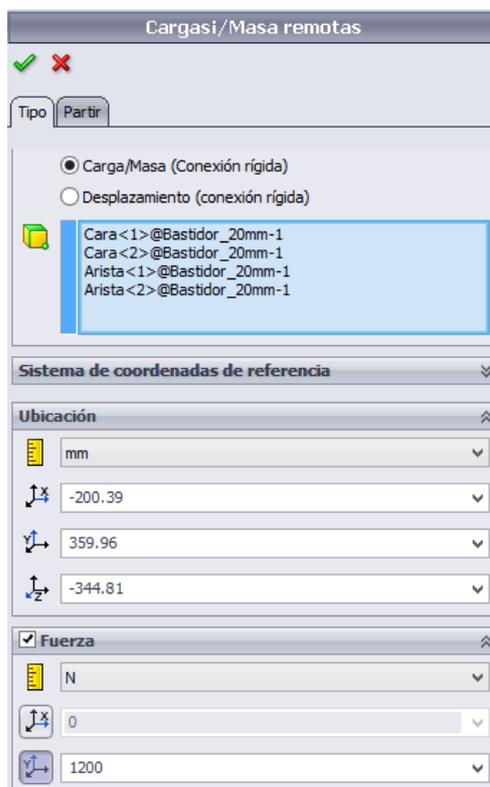


Figura 42: Menú configuración masas remotas

En el recuadro en azul se establecen las caras y aristas sobre las que se ejerce la fuerza, son las zonas de contacto de la tija del sillín con el bastidor, configurado como conexión rígida.

En la siguiente sección se debe establecer el punto donde se aplicara la fuerza [2], que está situado a 70mm detrás de la intersección entre la tija del sillín y este, esta intersección debe estar a 250mm de la zona donde se inserta la tija, obteniendo la siguiente coordenada midiendo en el ensamblaje:

- $X = -200,39$ mm
- $Y = 359,96$ mm
- $Z = -344,81$ mm

En el último apartado se establece la magnitud de la fuerza, la dirección y el sentido. 1200N en la dirección del eje Y, invertida.

Para establecer la fuerza ejercida por la gravedad se debe seleccionar en el menú de "Cargas externas" la opción "Gravedad" y dejar los valores por defecto.

Visualmente las fuerzas quedan establecidas de la siguiente forma:

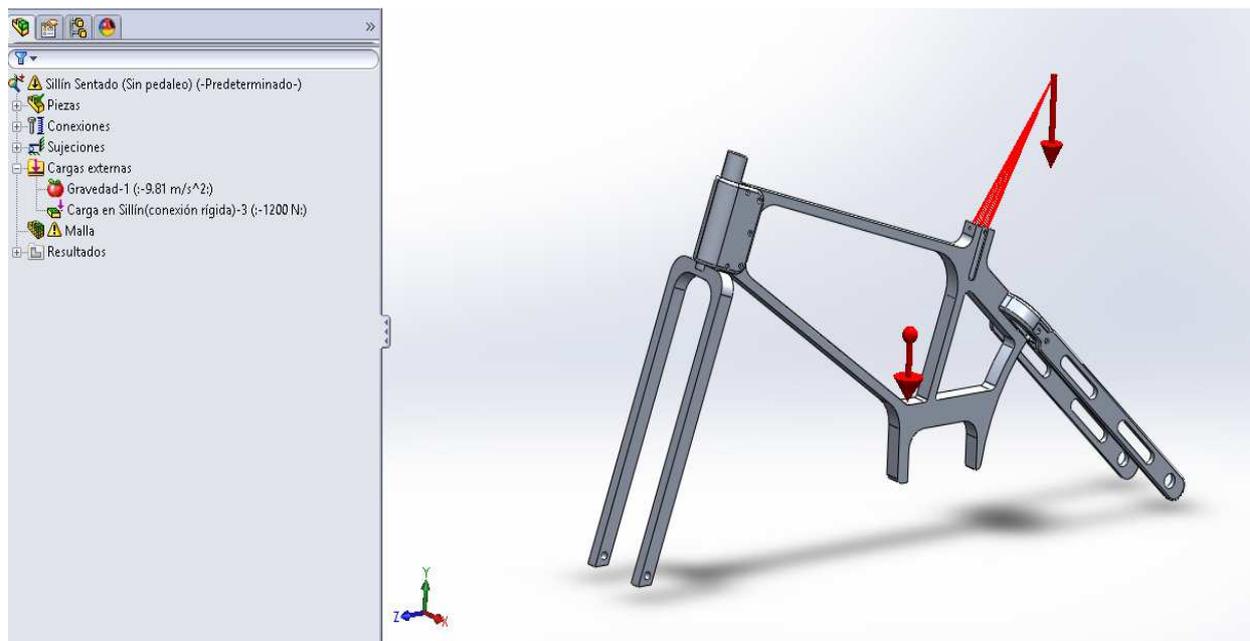


Figura 43: Representación de fuerzas

Para establecer el material para el estudio, seleccionamos en el menú "Piezas" la opción "Aplicar el material a todo..." y seleccionaremos aleación 6061:

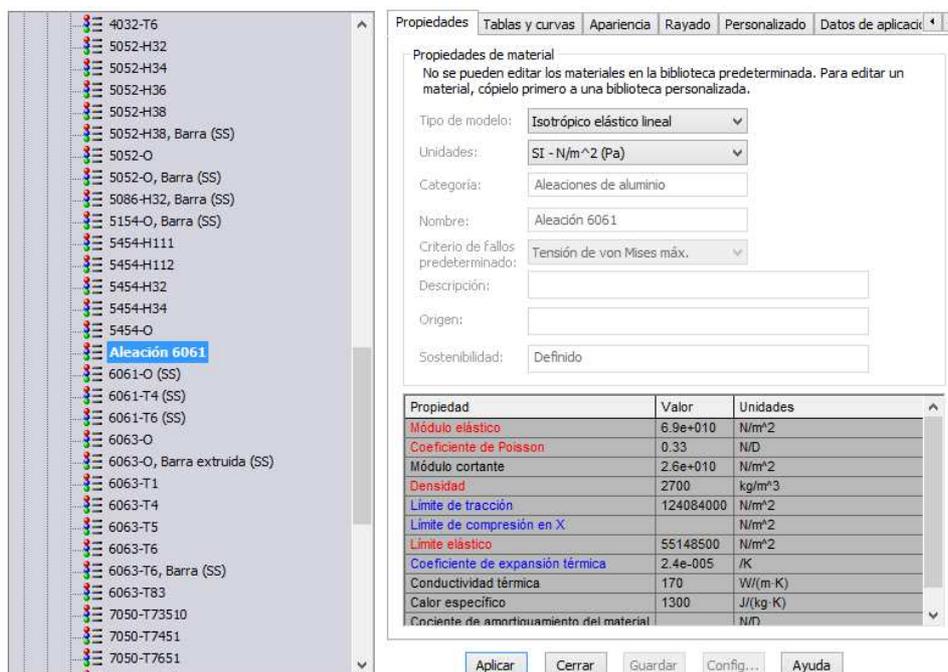


Figura 44: Selección de material

Estableceremos dos puntos de apoyo en el bastidor:

- Apoyo horquilla delantera: desplazamiento en eje X, desplazamiento en Y restringido, sin giro.

- Apoyo en puntera trasera del cuadro: Desplazamientos en X e Y restringido, giro permitido.

Para el primer apoyo seleccionaremos en el menú "Sujeciones" la opción "Rodillo/Control deslizante...", a continuación se deben seleccionar las caras inferiores de la horquilla:

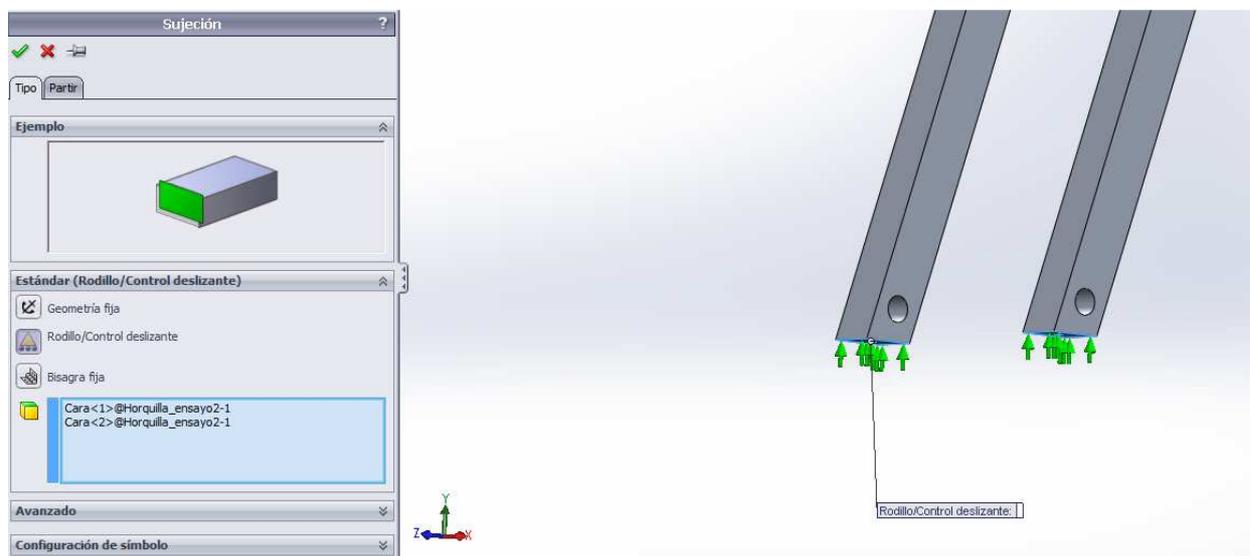


Figura 45: Apoyo delantero

Para el primer apoyo se debe seleccionar en el menú "Sujeciones" la opción "Bisagra fija" (Fixed Hinge), a continuación seleccionaremos las caras cilíndricas interiores del bastidor:

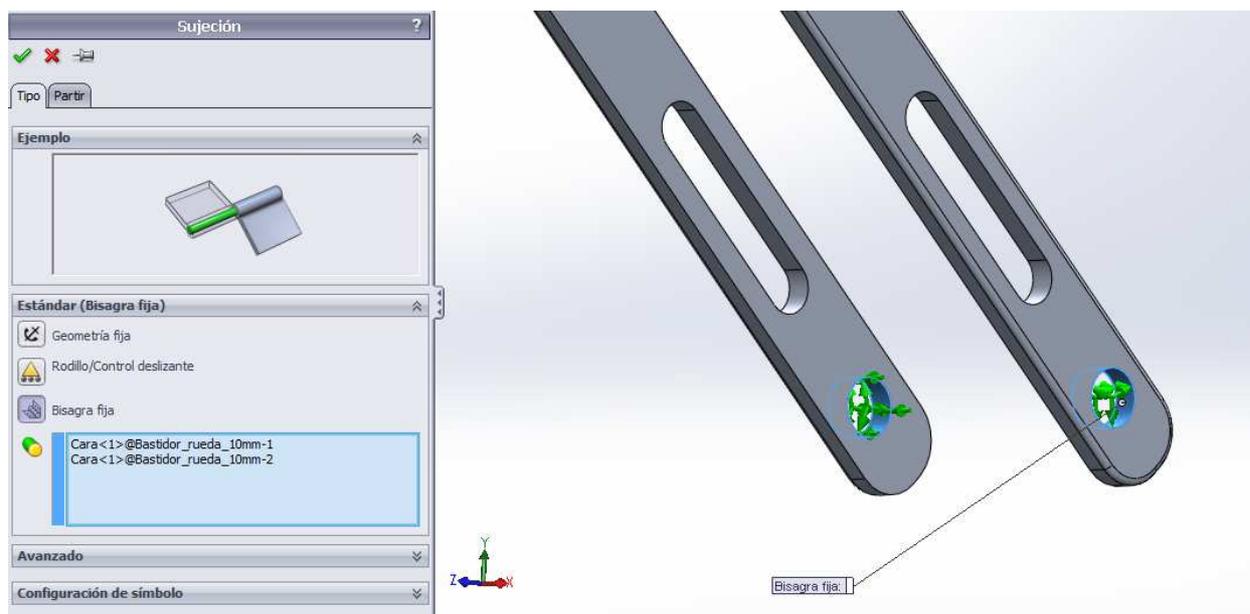


Figura 46: Apoyo trasero

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Ya que el bastidor no está formado por una única pieza hay que establecer los contactos entre las distintas piezas que lo forman y el tipo de unión, para nuestro caso se han utilizado tornillos.

Para establecer el tipo de contacto seleccionamos en el menú "Conexiones" la opción "Contactos entre componentes" entre las distintas opciones que nos ofrece seleccionaremos "Sin penetración" para que así trate a todos los componentes como piezas individuales permitiendo que haya contactos entre ellos pero que no puedan penetrarse. Esta opción es la que invierte más tiempo en resolverse.

La opción "Unión rígida" toma todas las piezas como una sola por lo que no existirían uniones entre las piezas. lo que provoca que los esfuerzos en los tornillos sean nulos y que es el fin de este análisis, es la opción menos real y que por tanto tarda menos tiempo en resolverse.

En el segundo recuadro se debe desmarcar la opción "Contacto global" y seleccionamos todas las piezas que están en contacto entre sí.

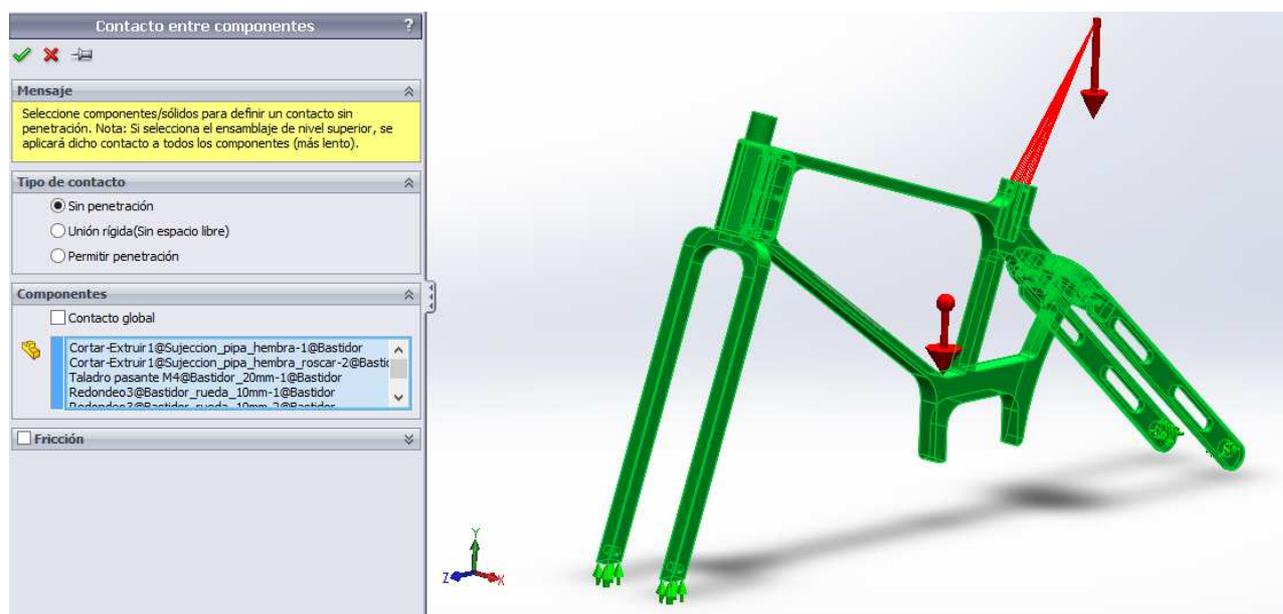


Figura 47: Selección tipo de contacto entre piezas

Para establecer los contactos entre las piezas, es decir las caras o aristas que están en contacto entre las distintas piezas, seleccionamos en el menú "Conexiones" la opción "Conjuntos de contactos" y luego "Contactos...". Marcamos la opción "Seleccionar manualmente conjuntos de contactos" y en los dos recuadros inferiores seleccionamos los pares de caras en contacto de todo en el ensamblaje dejando por defecto el tipo "Sin penetración":

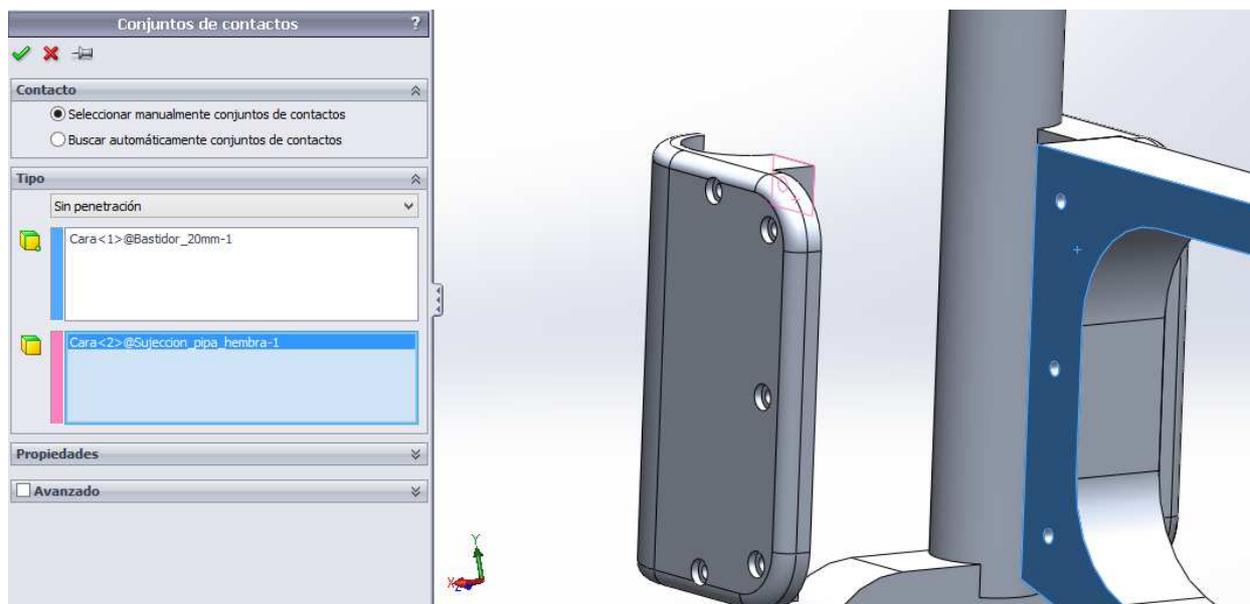


Figura 48: Configuración contacto entre piezas

Hay que establecer el tipo de unión entre las piezas. Para establecer que están unidas mediante tornillos, seleccionamos en el menú "Conexiones" la opción "Perno" eligiendo la opción de "Tornillo estándar o refrentado", en el primer recuadro estableceremos la arista circular que está en contacto con la cabeza del vástago, en el segundo recuadro estableceremos la cara cilíndrica roscada:

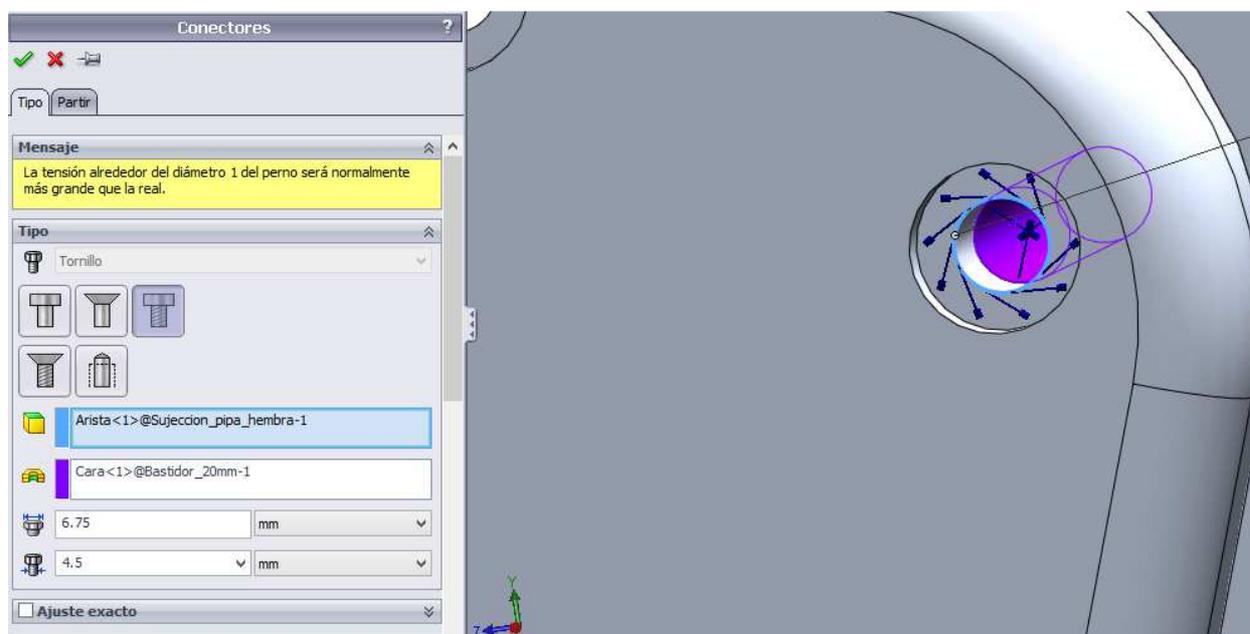


Figura 49: Configuración de unión mediante tornillos

Quedándonos la siguiente configuración general:

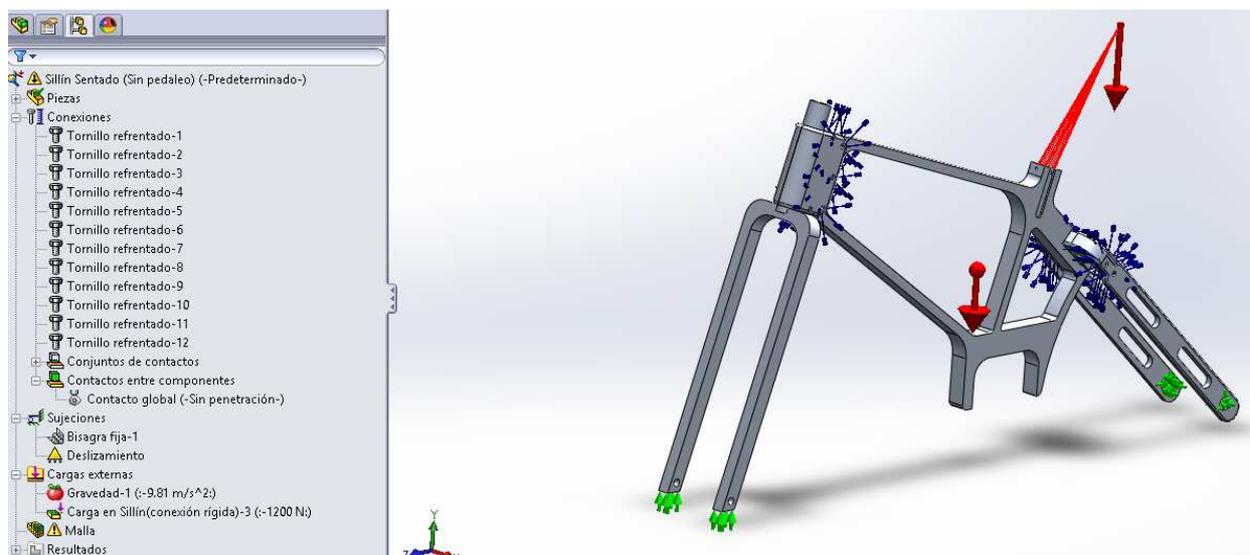


Figura 50: Configuración final

Para configurar la malla seleccionamos en el menú "Malla" la opción "Crear malla" y establecemos la densidad de malla en su máximo para que el modelo contenga mayor número de puntos a la hora de analizar el bastidor y los resultados sean más reales:

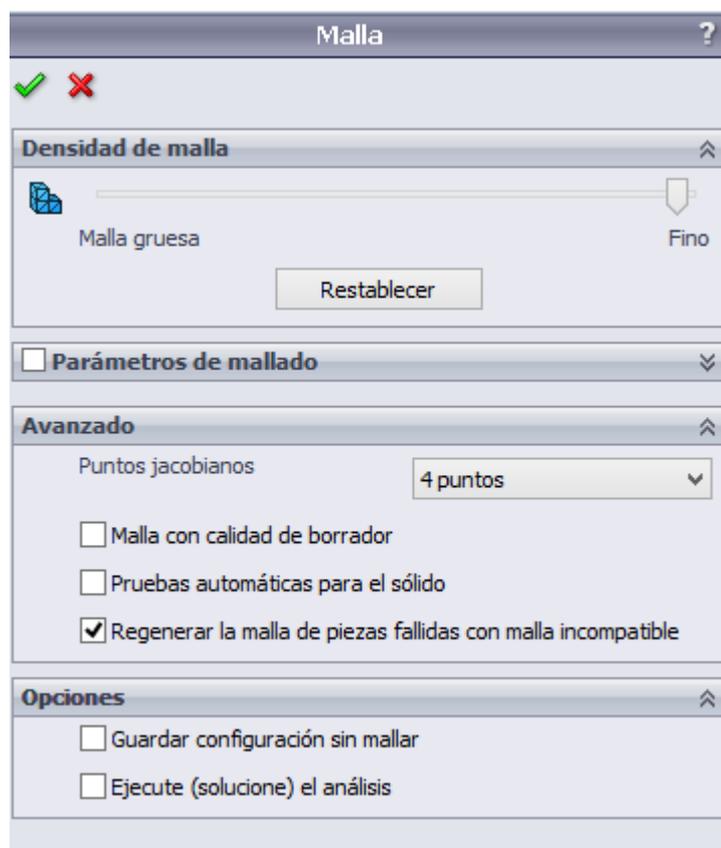


Figura 51: Configuración de malla

Obteniendo el siguiente mallado:

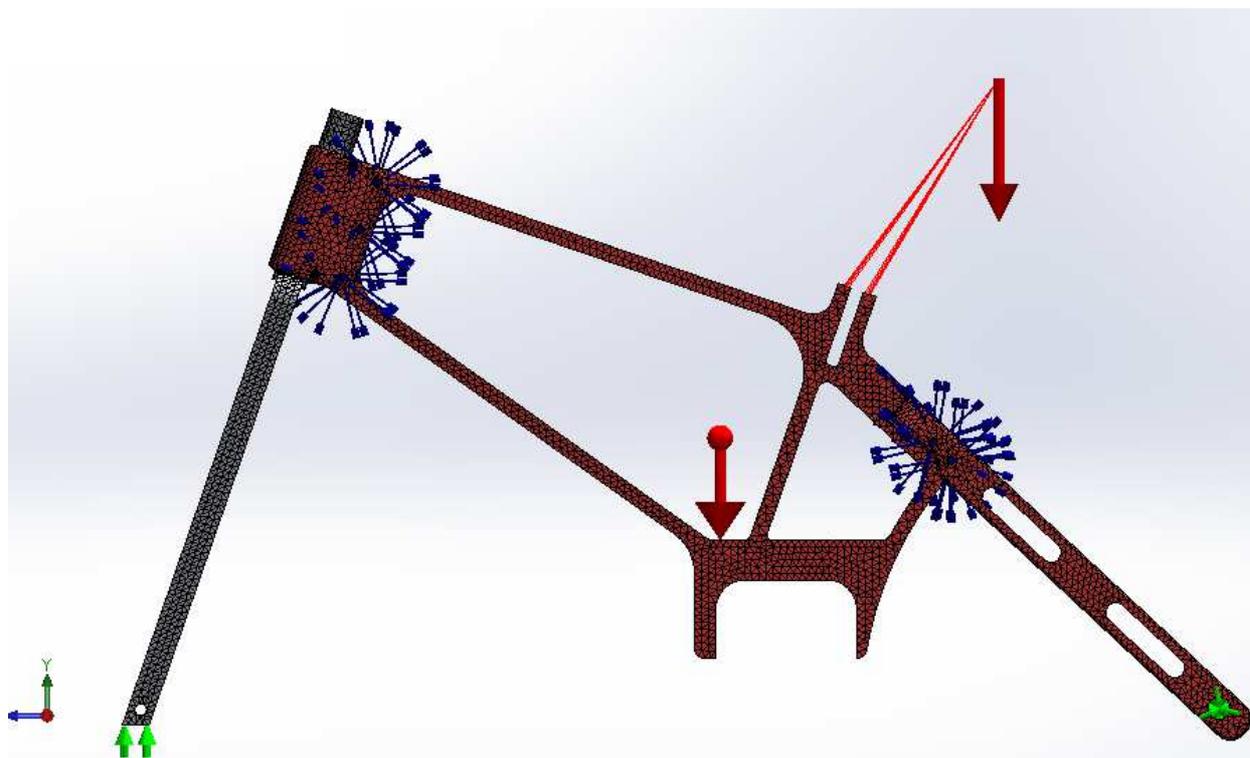


Figura 52: Mallado

Antes de ejecutar el análisis resulta interesante comprobar que en el ensamblaje de las piezas no existen interferencias entre estas, lo que provocaría un error y no permitiría la realización de este, para ello seleccionamos en el menú "*Herramientas*" la opción "*Detección de interferencias...*" y nos muestra si existe alguna interferencia.

Finalmente seleccionamos "*Ejecutar*" para iniciar el análisis. Debido a los siguientes motivos el software invierte un tiempo elevado en mostrar los resultados:

- Número de piezas considerable
- Geometría de piezas compleja
- Contactos de tipo "Sin penetración"
- Malla muy fina

Una vez concluido el análisis obtenemos los datos de las fuerzas resultantes en los tornillos, seleccionando en el menú "*Resultados*" la opción "*Listar fuerzas de pasador/perno/rodamientos...*", de donde se obtuvieron los valores de la siguiente tabla:

<i>Fuerza cortante (N)</i>	<i>Fuerza axial (N)</i>	<i>Momento flector (N-m)</i>	<i>Tornillo</i>
21,27	69,58	0,02	1
19,13	0	0,02	2
11,13	0	0,13	3
53,01	0	0,03	4

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

1,52	31,12	0,01	5
29,03	38,04	0,26	6
96,07	180,55	13,81	7
79,93	0	11,27	8
3064,1	758,06	15,55	9
2928,6	66,55	15,99	10
3784	696,59	18,92	11
2284,6	39,04	12,69	12

Tabla 9: Fuerzas resultantes en tornillos

Apreciamos que el tornillo más solicitado es el 11 situado en la unión trasera del bastidor.

Comprobación de la unión atornillada

Han sido calculados los esfuerzos de los tornillos a cortadura y a tracción, ya que los tornillos no son pretensados, de ser así no estarían sometidos a cortadura ya que esta sería absorbida por la fuerza de rozamiento entre las placas y los tornillos.

Para facilitar el montaje y mantenimiento han sido utilizados tornillos de igual métrica para todas las uniones por lo que se comprueban la restricciones para el tornillo más solicitado, con los siguientes valores:

$$F_{v,Ed} = 3,78 \text{ kN}$$

$$F_{t,Ed} = 0,69 \text{ kN}$$

Para ello se suponen tornillos de métrica 6 y métrica 4 de calidad 8.8 que son de alta resistencia.

A partir de estos datos se obtienen los datos necesarios para ambos cálculos de la siguiente tabla:

HEX BOLTS - MINIMUM TENSILE STRESS (MPa or N/mm ²)						
Nominal Size	Pitch mm	Stress Area mm ²	Class 4.6	Class 8.8	AS1252	Class 10.9
M3	0.50	5.03	400	800	-	1040
M4	0.70	8.78	400	800	-	1040
M5	0.80	14.20	400	800	-	1040
M6	1.00	20.10	400	800	-	1040
M8	1.25	36.60	400	800	-	1040

Tabla 10: Características de tornillos por métricas

Obteniendo un área resistente del tornillo:

$$A_{s,M4} = 8,78 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,M6} = 20,10 \text{ mm}^2$$

Tensión de rotura:

$$f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

Resistencia a cortadura

Se debe cumplir que la tensión cortante a la que esté sometida el tornillo sea inferior a $F_{v, Rd}$, siendo esta:

$$F_{v, Rd} = n \cdot \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \frac{A}{\gamma_{Mb}}$$

- n = es el número de planos de corte, valor **1** para simple cortadura que es nuestro caso
- $\alpha_v = 0.5$ excepto para tornillos de calidad 4.6, 5.6, 8.8 que será de 0.6
- f_{ub} = tensión última a tracción del tornillo 800N/mm^2 , valor obtenido al multiplicar el primer dígito del tipo de calidad del tornillo por 100 .
- A = área del tornillo. Existen dos tipos en función de si el plano de corte está en la zona roscada. A_d si el plano de corte está en el vástago y A_s si está en la parte roscada. En nuestro caso es A_d , calculándose como:

$$A = A_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Correspondiendo a d un valor de 6mm para M6 y 4mm para M4.

- γ_{Mb} = Coeficiente de seguridad para tornillos de 1.25

Obteniendo:

$$F_{v, Rd, M4} = 4,82 \text{ kN}$$

$$F_{v, Rd, M6} = 10,86 \text{ kN}$$

Ningún tornillo puede estar sometido a un esfuerzo cortante superior al anterior.

Resistencia a tracción

Se debe cumplir que la tensión cortante a la que esté sometida el tornillo sea inferior a $F_{t, Rd}$. Siendo esta:

$$F_{t, Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_S}{\gamma_{Mb}}$$

- $k_2 = 0.9$ para tornillos sin cabeza avellanada
- f_{ub} = tensión última a tracción del tornillo 800N/mm^2
- A_S = es la sección resistente de la parte roscada obtenida de la tabla .
- γ_{Mb} = Coeficiente de seguridad para uniones atornilladas de 1.25

Obteniendo:

$$F_{t, Rd, M4} = 5,05 \text{ kN}$$

$$F_{t, Rd, M6} = 11,58 \text{ kN}$$

Ningún tornillo puede estar sometido a un esfuerzo de tracción superior al anterior.

Resistencia a cortadura y a tracción

Los tornillos solicitados a cortante y tracción deben cumplir además de las dos condiciones anteriores la siguiente:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

- $F_{v,Ed}$ = Esfuerzo cortante al que está sometido el tornillo
- $F_{t,Ed}$ = Esfuerzo a tracción al que está sometido el tornillo

Para M4 calidad 8.8:

$$F_{v, Rd, M4} = 4,82 \text{ kN}$$

$$F_{t, Rd, M4} = 5,05 \text{ kN}$$

Obtenemos:

$$0,88 \leq 1$$

Para M6 calidad 8.8:

$$F_{v, Rd, M6} = 10,86 \text{ kN}$$

$$F_{t, Rd, M6} = 11,58 \text{ kN}$$

Obtenemos:

$$0,39 \leq 1$$

Resistencia al aplastamiento

Es la resistencia al aplastamiento de la chapa en la zona de contacto con el tornillo, se obtiene de:

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}}$$

- f_u = Límite de tracción del material de la chapa en contacto con el tornillo (**124,28N/mm²** para aluminio de aleación 6061)
- α = Es 1 o el menor valor de las expresiones:

$$\frac{e_1}{3 \cdot d_0}$$

$$\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u}$$

Los valores de e_1 , d_0 , p_1 , f_{ub} fueron calculados anteriormente. Obteniendo los siguientes valores respectivamente:

0,4 0,48 y 6,45 para M6 y M4

Tomaremos α como 0,4

- d = diámetro del tornillo, 6mm para M6 y 4mm para M4
- t = espesor de la chapa, chapa más fina utilizada 10mm
- γ_{Mb} = Coeficiente de seguridad para uniones atornilladas de 1.25

Obteniendo:

$$F_{b,Rd, M4} = \mathbf{3,98 \text{ kN}}$$

$$F_{b,Rd, M6} = \mathbf{5,96 \text{ kN}}$$

Ninguna de las fuerzas a las que están sometidos los tornillos ya sean cortantes o axiales deben superar el valor anterior para así no dañar las chapas de aluminio.

De ser así las posibles soluciones son las siguientes:

- Aumentar el número de tornillos
- Utilizar una métrica superior de tornillos
- Utilizar un grosor de chapa superior
- Utilizar otro tipo de material para la chapa con un límite de tracción superior

Solución final

Se ha recogido en la siguiente tabla los esfuerzos que debe resistir el tornillo:

<i>F_{cortante solicitada} (kN)</i>	<i>F_{tracción solicitada} (kN)</i>	<i>F_{aplastamiento Solicitada} (kN)</i>
3,78	0,69	3,78

Tabla 11: Requisitos tornillo más solicitado

En la siguiente tabla se muestra las características de los tornillos de métricas 4 y 6:

<i>F_{cortante M4} (kN)</i>	<i>F_{tracción M4} (kN)</i>	<i>F_{aplastamiento M4} (kN)</i>	<i>K_{cortante y tracción M4} (≤ 1)</i>
4,82	5,05	3,98	0,88
<i>F_{cortante M6} (kN)</i>	<i>F_{tracción M6} (kN)</i>	<i>F_{aplastamiento M6} (kN)</i>	<i>K_{cortante y tracción M6} (≤ 1)</i>
10,86	11,58	5,96	0,39

Tabla 12: Resultados por métricas

Ambas métricas cumplen con los requisitos establecidos, se ha decidido usar M6 para los tornillos para tener mayor seguridad en las uniones ya que los datos de partida se obtuvieron de una simulación de elementos finitos que puede diferir del comportamiento real de la bicicleta en su uso real.

4.4 ENSAYOS

Se establecieron una serie de ensayos sobre el cuadro de la bicicleta que pudieran representar lo más posible las situaciones reales a las que este pueda estar sometido y que fueran lo más semejantes a los ensayos que establece la norma UNE–EN 14764:2006 *Bicicletas de paseo, requisitos de seguridad y métodos de ensayo*, sin olvidar que lo que se pretende con este proyecto es un prototipo.

Esta norma establece tres tipos de ensayos a los que se debe someter el cuadro de la bicicleta:

Conjunto cuadro - Horquilla delantera - Ensayo de choque (caída de una masa) [4]

El cuadro debe estar equipado con la horquilla delantera pudiendo sustituir esta por una tija maciza de acero. Después del ensayo no debe de haber ninguna fisura ni rotura visible en el conjunto.

La deformación permanente entre los ejes de las ruedas no debe sobrepasar:

a) 30mm cuándo la horquilla está montada

b) 15mm cuándo se ha montado una tija maciza en lugar de la horquilla

El método de ensayo debe ser con la horquilla colocada en un rodillo delantero que tenga una masa inferior o igual a 1Kg. Si se está usando una tija maciza su extremo debe estar redondeado,

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

cuya forma sea semejante a la del rodillo. Se coloca el conjunto cuadro - horquilla o cuadro - barra en posición vertical en un dispositivo de fijación rígida, utilizando los puntos de fijación del eje trasero como se muestra en la figura:

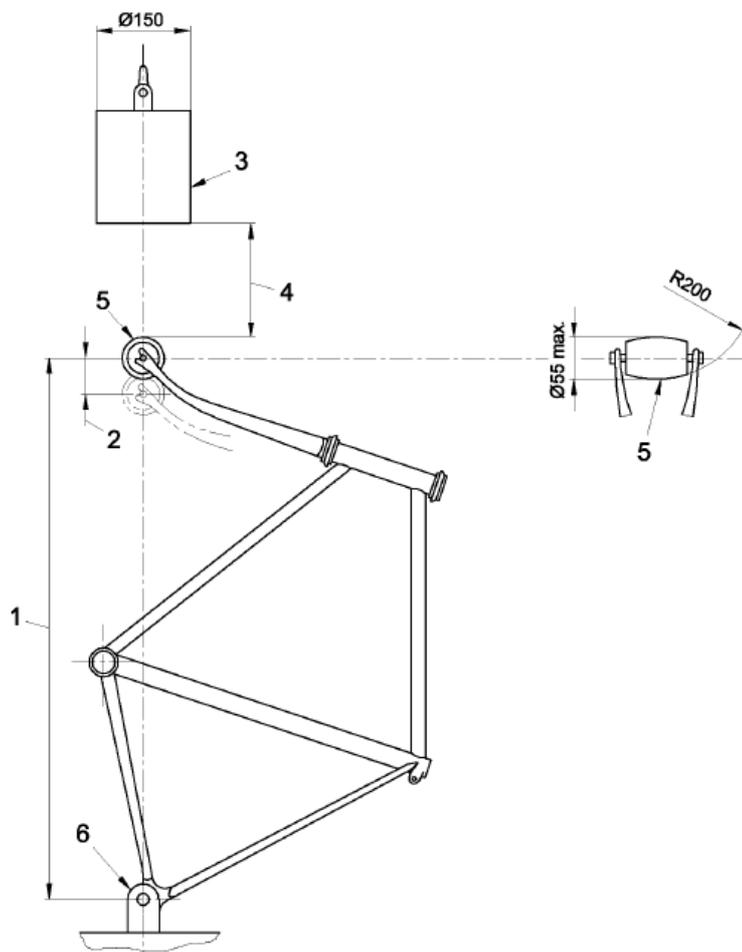


Figura 53: Esquema ensayo de choque

Siendo:

- 1 Distancia entre ejes
- 2 Deformación permanente
- 3 Percutor de 22,5Kg
- 4 Altura de caída de 180mm
- 5 Rodillo de pequeña masa (1kg máx.)
- 6 Fijación rígida en el punto de enganche del eje trasero

Se coloca un percutor que tenga una masa de 22,5 Kg sobre el rodillo colocado en las punteras de la horquilla o sobre la extremidad redondeada de la tija maciza y se mide la distancia entre los ejes. Se levanta el percutor a una altura de 180mm por encima del rodillo y de la pequeña masa y se suelta para que percuta en el rodillo o a la tija de acero en un punto alineado con los centros de las ruedas y contra la dirección de inclinación de la horquilla o de la tija. Cuando el percutor se detiene después de rebotar sobre el rodillo o la tija maciza, se mide de nuevo la distancia entre ejes.

Cuadro - Ensayo de fatiga con las fuerzas de pedaleo [4]

Después del ensayo no debe de haber ninguna fisura ni rotura visible en el conjunto.

Para este ensayo se usa un conjunto de cuadro/horquilla nuevo provisto de rodamientos de dirección normal. La horquilla delantera puede sustituirse por una falsa horquilla, que tenga la misma longitud y al menos la misma rigidez que la horquilla de origen.

Se monta el conjunto cuadro/horquilla sobre una base con la horquilla verdadera o la falsa fijada por su eje a un dispositivo de fijación y con el buje libre para oscilar alrededor de su eje. Se fijan las punteras traseras por medio de un eje a una unión vertical rígida que tiene la misma altura que el dispositivo rígido de fijación delantero, con la parte superior libre para oscilar alrededor del centro del eje, pero garantizando una rigidez en un plano lateral y estando provista la extremidad inferior de la unión de una junta esférica.

Se instala un conjunto de biela y plato y cadena con una cadena montada o, preferiblemente, un conjunto de sustitución rígido y resistente, en la caja de pedalier como se muestra en la figura.

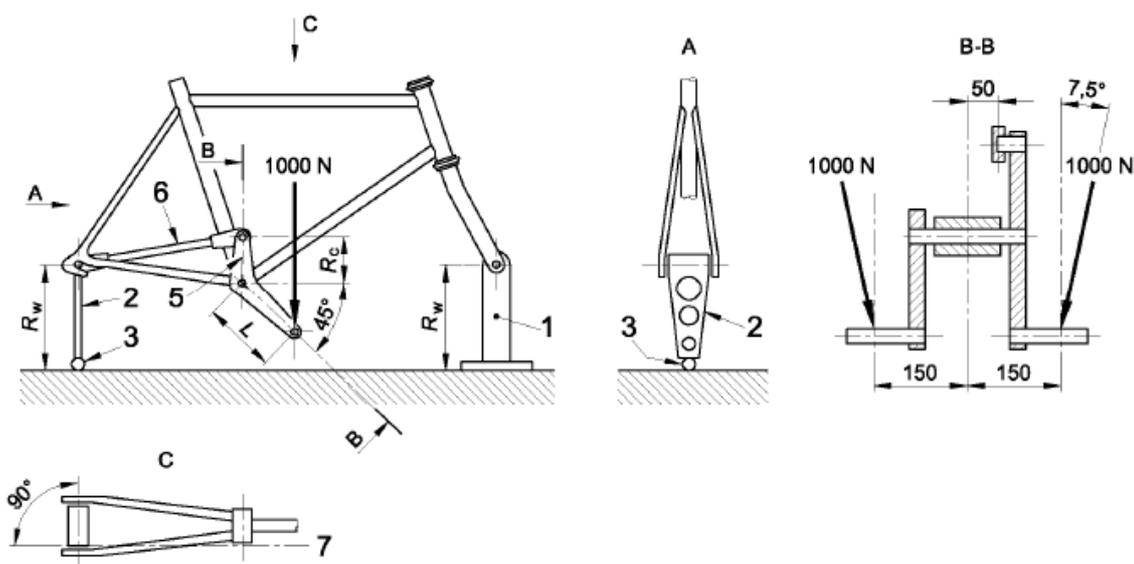


Figura 54: Esquema ensayo de fatiga por pedaleo

Siendo:

- R_w Altura del dispositivo de fijación rígida y unión vertical
- R_c Longitud del brazo vertical (75 mm)
- L Longitud de la biela de sustitución (175 mm)
- 1 Montaje rígido
- 2 Unión Vertical
- 3 Junta esférica
- 4 Montaje adaptador
- 5 Brazo vertical

- 6 Tirante
- 7 Eje de tirante

Se somete cada eje de pedal (o componente de ensayo equivalente) a una fuerza repetida F , de 1000N en un punto situado a 150 mm del eje del cuadro en un plano transversal vertical y con una inclinación de $7,5^\circ$ respecto al plano longitudinal del cuadro. Durante la aplicación de estas fuerzas de ensayo, se verifica que la fuerza sobre un "eje de pedal" ha descendido al 5% o menos de la fuerza máxima antes de comenzar a aplicar la fuerza de ensayo al otro "eje de pedal".

Se aplican las fuerzas de ensayo durante 100000 ciclos de ensayo, sabiendo que un ciclo de ensayo consiste en aplicar y después retirar las dos fuerzas de ensayo.

Cuadro - Ensayo de fatiga con una fuerza vertical [4]

Después del ensayo no debe de haber ninguna fisura ni rotura visible en el conjunto.

Se instala el cuadro en su posición normal, fijándolo a las punteras traseras, de tal forma que no esté limitado en su rotación. Se instala un rodillo apropiado en el eje delantero para permitir al cuadro flexionar en el sentido longitudinal bajo el efecto de las fuerzas de ensayo.

Se introduce una tija maciza redonda de acero equivalente a una tija de sillín en la parte superior del tubo del sillín a una profundidad de 75mm y se fija con la ayuda del dispositivo de sujeción normal y según las instrucciones del fabricante. Se fija rígidamente una extensión horizontal dirigida hacia atrás a la parte superior de esta tija de tal forma que su longitud coloca el punto H en una posición equivalente a la del centro del bastidor del sillín cuando la bicicleta está ajustada a la altura máxima del sillín recomendada para el cuadro en cuestión; o si no se dispone de la información sobre la altura máxima del sillín, h debe valer 250mm.

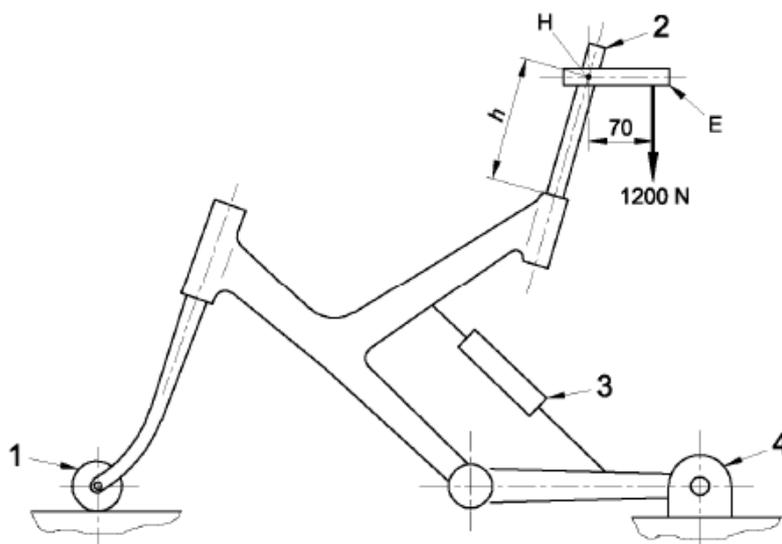


Figura 55: Esquema ensayo fatiga fuerza vertical

Siendo:

- 1 Rodillo que puede girar libremente
- 2 Tija de acero
- 3 Unidad de suspensión bloqueada o unión rígida para vainas pivotantes
- 4 Montura rígida pivotante para el punto de fijación del eje trasero

Se aplican fuerzas dinámicas verticales de 0 a +1000N en un punto a 70 mm detrás de la intersección de los ejes de la tija maciza de acero y de la extensión E, durante 50000 ciclos de ensayo con una frecuencia de ensayo inferior o igual a 25 Hz.

Ensayos mediante Solidworks Simulation

Los ensayos anteriormente son difícilmente reproducibles mediante por Solidworks, así que han sido adaptados con el fin de poder lograr unos resultados aproximados del conjunto final que nos sirvieran en nuestro diseño.

Para obtener el peso del ciclista utilizamos la norma UNE-EN 14764:2006 [4] ya que en uno de sus ensayos hace uso de una fuerza vertical en el sillín que puede ser interpretada como el peso del ciclista, esta fuerza es de 1200N

$$\text{Peso ciclista} = 1200/9.8 = 122.45 \text{ Kg}$$

Este valor está muy por encima del peso real del ciclista pero nos ha servido como factor de seguridad ya que los ensayos realizados son estáticos lo que difiere con las fuerzas dinámicas a las que está sometida realmente la bicicleta.

El cuadro de la bicicleta se apoya sobre las ruedas que están en contacto con el suelo, las cuales transmiten la carga a través de los radios al buje y estos al cuadro, por ello los apoyos del conjunto se suponen en las zonas donde se unen las ruedas a la horquilla y al cuadro.

Los análisis que han sido realizados son estáticos, suponiendo que el conjunto formado por las ruedas es indeformables y que la bicicleta está siempre en contacto con el suelo.

El cuadro está apoyado impidiendo los desplazamientos X e Y pero admitiendo rotaciones en Z en el apoyo trasero, en el apoyo delantero se permite desplazamiento en X pero no en Y así como movimiento deslizante pero sin rotaciones.

Primera hipótesis de carga: Carga sobre el asiento.

Esta primera hipótesis de carga consiste en simular la posición del ciclista sentado sobre el asiento de la bicicleta sin apoyar los pies en los pedales.

Condiciones de contorno

- Apoyo horquilla delantera: desplazamiento en eje X, desplazamiento en Y restringido, sin giro. Sujeción tipo rodillo
- Apoyo en puntera trasera del cuadro: Desplazamientos en X e Y restringido, giro permitido. Sujeción tipo bisagra

Cargas

- Se estima una fuerza vertical ejercida por el ciclista debido a su peso de 1200N

Segunda hipótesis de carga: Carga sobre los pedales.

Esta segunda hipótesis de carga consiste en simular la posición del ciclista de pie sobre los pedales (sin apoyarse en el sillín) y sin pedalear.

Condiciones de contorno

- Apoyo horquilla delantera: desplazamiento en eje X, desplazamiento en Y restringido, sin giro. Sujeción tipo rodillo
- Apoyo en puntera trasera del cuadro: Desplazamientos en X e Y restringido, giro permitido. Sujeción tipo bisagra

Cargas

- Se reparte la fuerza de **1200N** debido al peso del ciclista entre cada pedal, obteniendo 600N en cada uno, posicionando estos horizontalmente y con ángulo de 45° hacia abajo como se especifica en la norma UNE-EN 14764:2006 [4].

Tercera hipótesis de carga: Sentado pedaleando.

Esta tercera hipótesis de carga consiste en simular la posición del ciclista sentado pedaleando. Suponemos un peso de una persona de 122.45Kg, es decir 1200N de fuerza vertical.

El par máximo al que puede estar sometido el bastidor es establecido por el máximo par que pueda desarrollar el generador y no el ciclista. Si el ciclista genera un par mayor que el que pueda producir el generador este se convertirá en una aceleración del eje del mismo.

El par máximo del generador es de 21 Nm [1].

Sabiendo que:

Par = Fuerzapedal * Longitudbiela

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

$$\text{Fuerzapedal} = \text{Par}/\text{longitud biela} = 21/0.17 = 123,53\text{N}$$

Con esto calculamos la fuerza ejercida en el sillín por el ciclista que se obtendría de restarle a la fuerza ejercida por el peso del ciclista menos la fuerza ejercida en los pedales:

$$\text{Fuerza sillín} = 1200\text{N} - 123,53\text{N} = 1076,47\text{N}$$

Condiciones de contorno

- Apoyo horquilla delantera: desplazamiento en eje X, desplazamiento en Y restringido, sin giro. Sujeción tipo rodillo
- Apoyo en puntera trasera del cuadro: Desplazamientos en X e Y restringido, giro permitido. Sujeción tipo bisagra

Cargas

- Fuerza vertical de **1076,47N** en el sillín
- Fuerza vertical de **123,53N** en el pedal, posicionando este horizontalmente y con ángulo de 45° hacia abajo
- Par de **21 Nm** que se ejerce sobre las caras en contacto del bastidor con el generador

Cuarta hipótesis de carga: De pie pedaleando.

Esta cuarta hipótesis de carga consiste en simular la posición del ciclista pedaleando de pie. Suponemos un peso de una persona de 122.45Kg, es decir 1200N de fuerza vertical.

Al igual que en la hipótesis anterior el par máximo al que puede estar sometido el bastidor es definido por el máximo par que pueda desarrollar el generador y no el ciclista.

El par máximo del generador es de 21 Nm [1].

Sabiendo que:

$$\text{Par} = \text{Fuerzapedal} * \text{Longitudbiela}$$

$$\text{Fuerzapedal} = \text{Par}/\text{longitud biela} = 21/0.17 = 123,53\text{N}$$

En este caso al ir de pie no habría fuerza en el sillín y todo el peso del ciclista estaría sobre el pedal, por lo que la fuerza total a la que está sometida el pedal será la resta de ambas, ya que el ciclista no puede ejercer más fuerza que su propio peso:

$$\text{Fuerza total pedal} = 1200\text{N} - 123,53\text{N} = 1076,47\text{N}$$

Condiciones de contorno

- Apoyo horquilla delantera: desplazamiento en eje X, desplazamiento en Y restringido, sin giro. Sujeción tipo rodillo
- Apoyo en puntera trasera del cuadro: Desplazamientos en X e Y restringido, giro permitido. Sujeción tipo bisagra

Cargas

- Fuerza vertical de **1076,47N** en el pedal, posicionando este horizontalmente y con ángulo de 45° hacia abajo
- Par de **21 Nm** que se ejerce sobre las caras en contacto del bastidor con el generador

Quinta hipótesis de carga: Carga frontal a horquilla.

Esta quinta hipótesis de carga consiste en someter a la estructura del cuadro a una fuerza frontal, es un ensayo muy común en el diseño de cuadros de bicicleta.

Condiciones de contorno

- Apoyo horquilla delantera: desplazamiento en eje X, desplazamiento en Y restringido, sin giro. Sujeción tipo rodillo.
- Apoyo en puntera trasera del cuadro: Desplazamientos en X e Y restringido, giro permitido. Sujeción tipo bisagra.

Cargas

- La fuerza será de **600N** repartida en cada una de la dos punteras de la horquilla, que será rígida.

Configuración Solidworks simulation

Los pasos para la configuración de los distintos ensayos a realizar han sido semejantes a los realizados anteriormente para el cálculo de uniones atornilladas con la diferencia de que al llegar al siguiente menú:

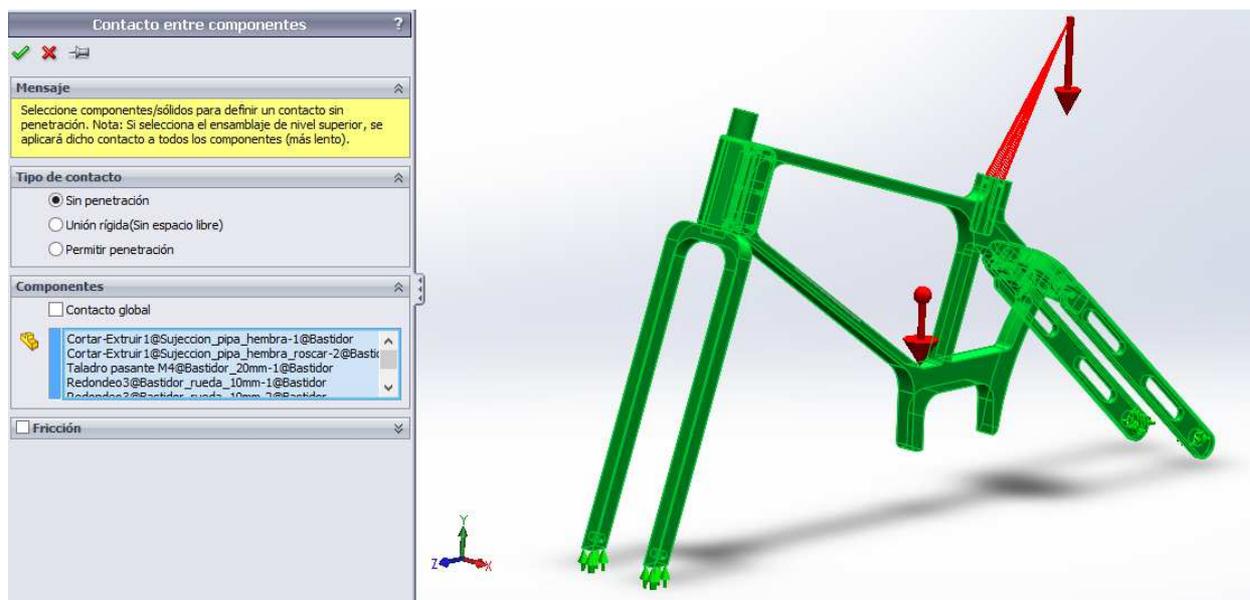


Figura 56: Configuración contacto entre piezas

Se debe seleccionar "*Unión rígida(Sin espacio libre)*" esta opción tomará todas las piezas que componen el cuadro como una sola por lo que no existen uniones entre las piezas. Esto hace que el tiempo invertido en las simulaciones sea muy inferior.

La configuración de las sujeciones así como la colocación de las fuerzas se han realizado de igual manera que anteriormente, configurando el mallado de igual manera:

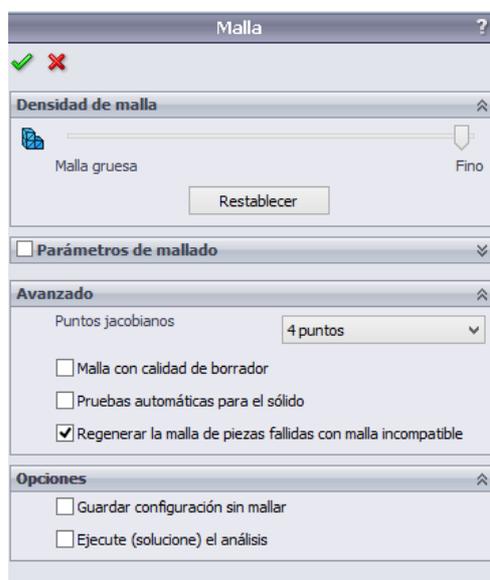


Figura 57: Configuración malla

Los resultados del primer ensayo sin hacer modificaciones fueron los siguientes, en todos ellos se ha tenido en cuenta la fuerza ejercida por la gravedad:

Nombre de modelo: Bastidor
Nombre de estudio: Sentado (Sin pedaleo)
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1

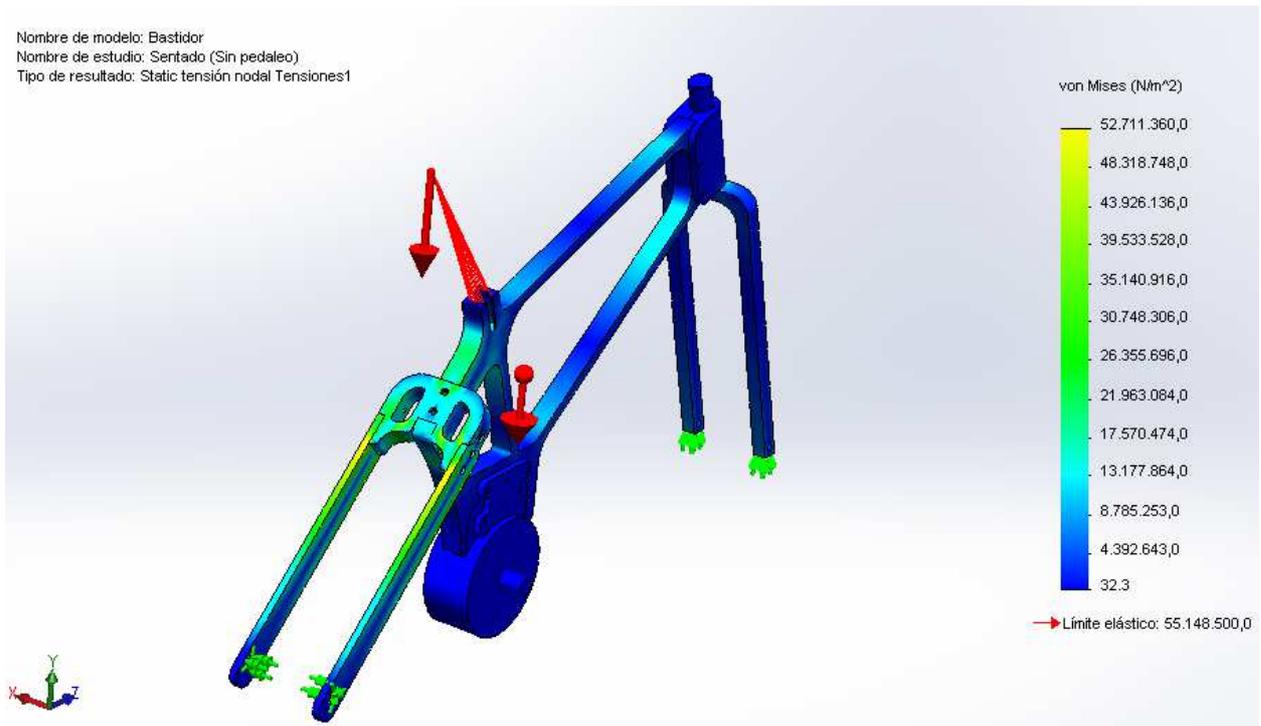


Figura 58: Ensayo sentado sin pedaleo, Tensión máxima: 52,71x106 N/m²

Nombre de modelo: Bastidor
Nombre de estudio: Sentado (Con pedaleo)
Tipo de resultado: Static tensión nodal Tensiones1

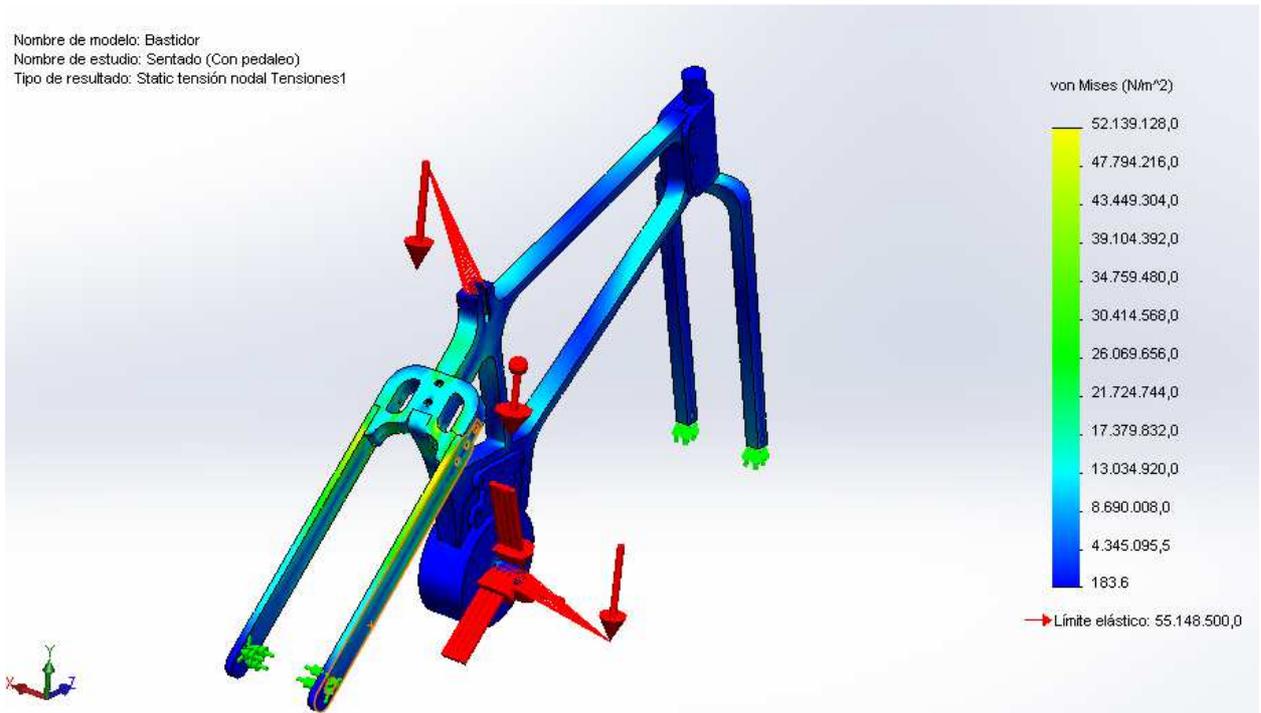


Figura 59: Ensayo sentado con pedaleo, Tensión máxima: 52,14x106 N/m²

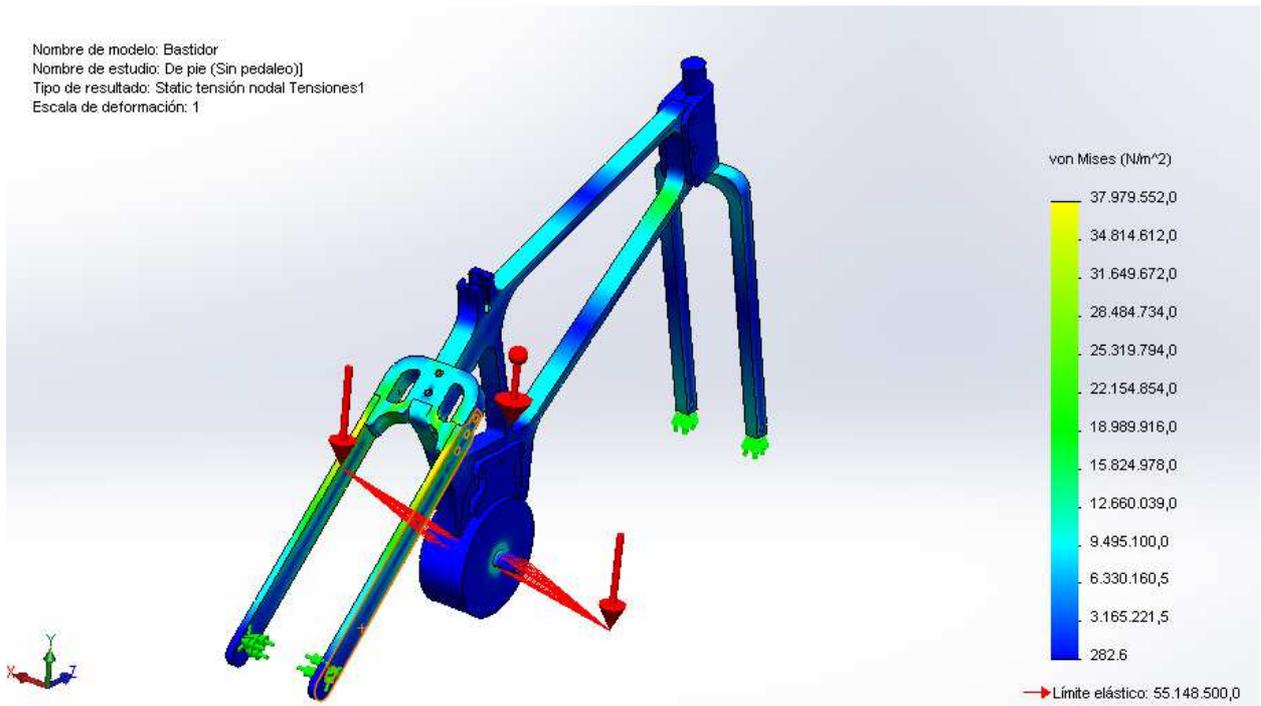


Figura 60: Ensayo de pie sin pedaleo, Tensión máxima: 37,98x10⁶ N/m²



Figura 61: Ensayo de pie con pedaleo, Tensión máxima: 97,22x10⁶ N/m²

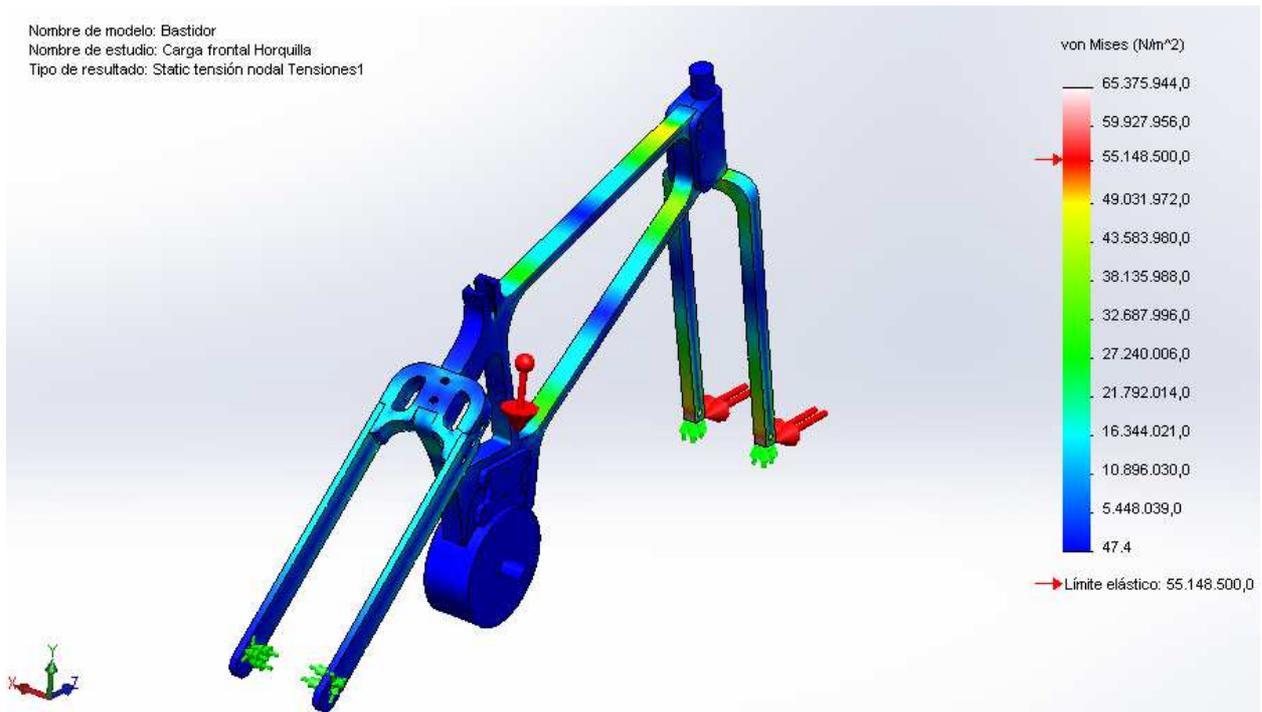


Figura 62: Ensayo carga frontal, Tensión máxima: 65,37x10⁶ N/m²

Se observa que el ensayo para el que está más solicitado el bastidor (siendo el único en el que se supera el límite elástico del material) es en el que se supone al ciclista de pie pedaleando.

Existe otro ensayo para el que se supera el límite elástico que es el carga frontal, pero no supone ningún problema ya que la zona en conflicto está situada en la horquilla que no forma parte de nuestro diseño, estando todas las zonas del bastidor por debajo del límite elástico.

Observando las siguientes zonas críticas:

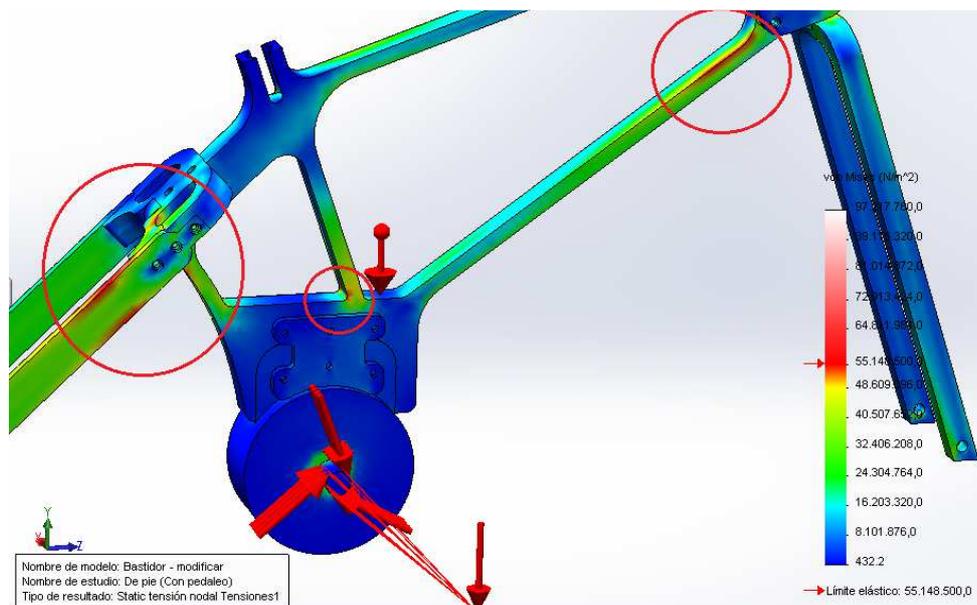


Figura 63: Zonas críticas en ensayo de pie con pedaleo

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Se ha modificado la geometría de las piezas que fallaron en el ensayo anterior para así reforzar las zonas más sensibles del bastidor, obteniendo los siguientes resultados:

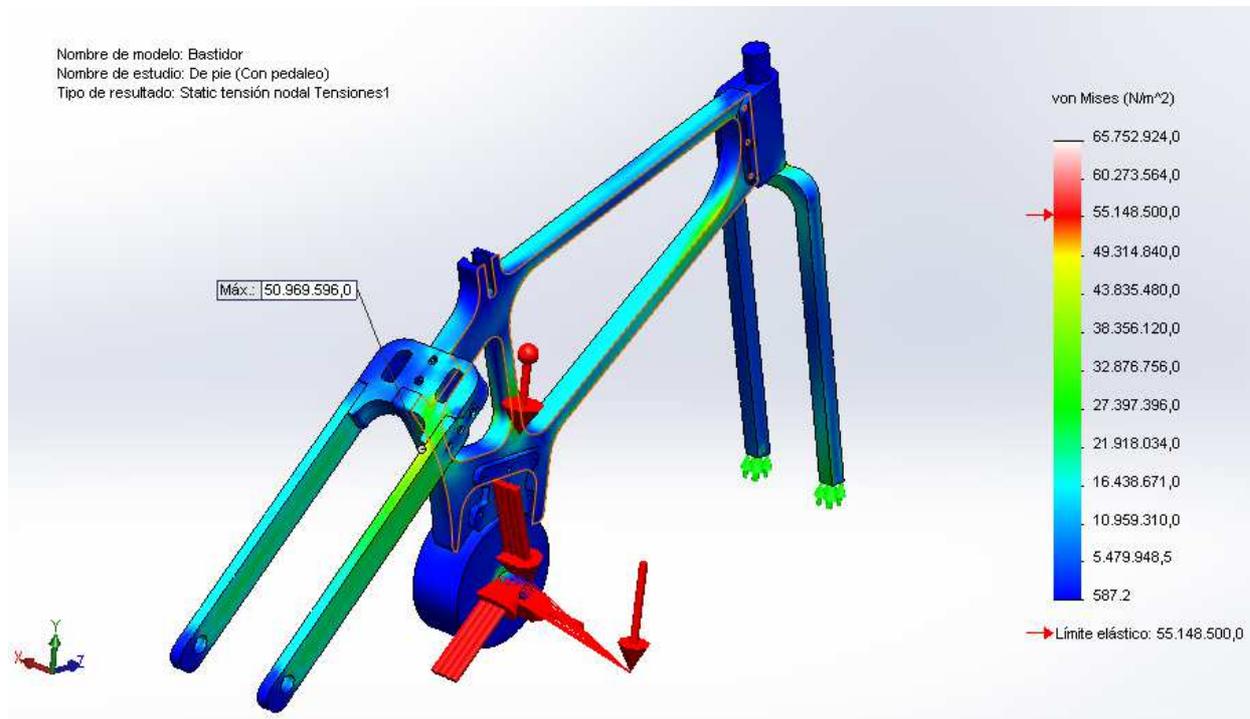


Figura 64: Resultado de modificación de bastidor

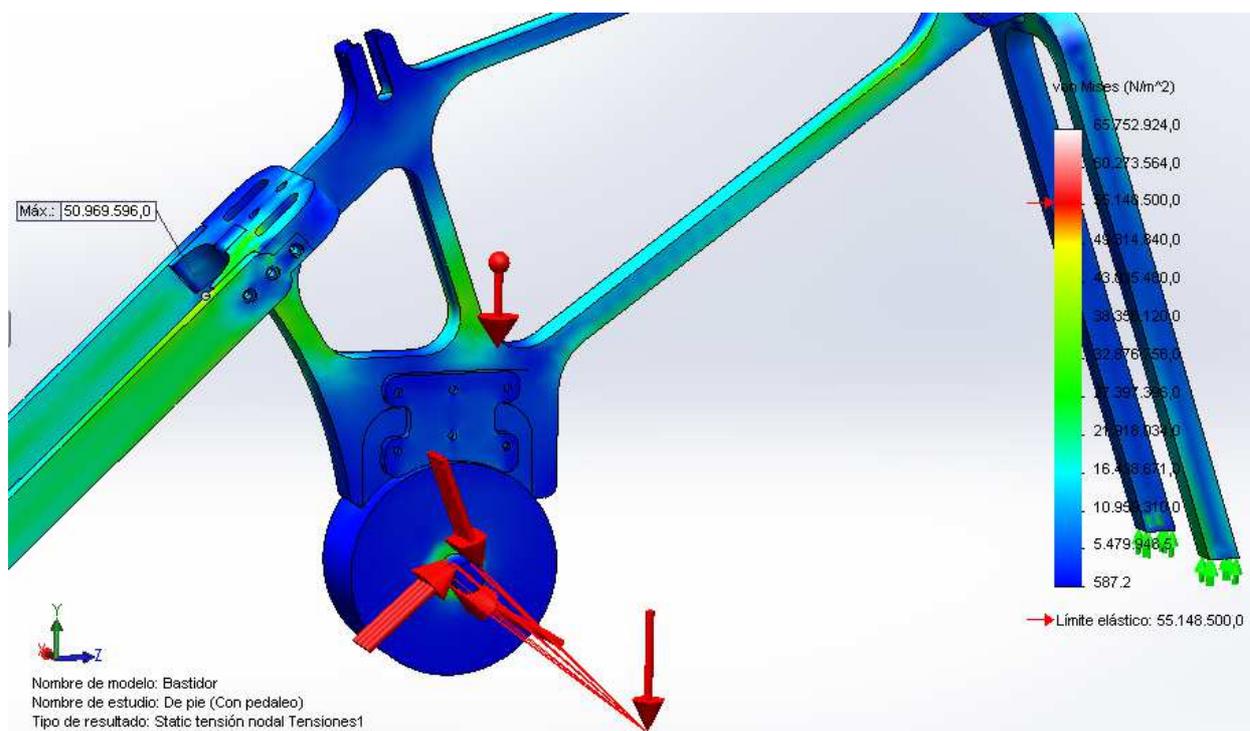


Figura 65: Vista lateral modificación de bastidor

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

La mayor tensión a la que está sometido el bastidor es de $50.97 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ que es inferior al límite elástico de la aleación 6061 que es de $55.15 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Ha sido modificado ligeramente el diseño para intentar reducir en todo lo posible el peso del conjunto, en la siguiente figura se observa el resultado final:

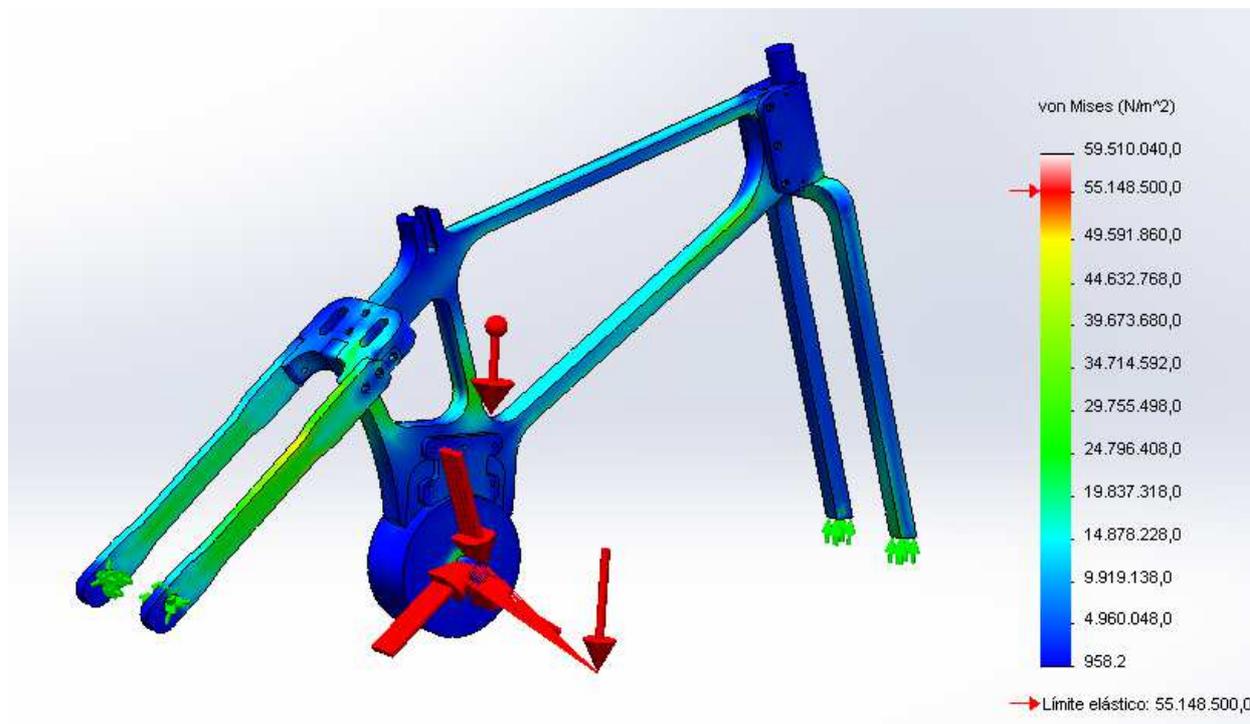


Figura 66: Bastidor aligerado

5. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL PROTOTIPO

La solución más lógica y más común para realizar un bastidor o cuadro de bicicleta sería la utilización de tubos de aluminio huecos, pero ello conllevaría la utilización de técnicas de soldadura siendo este método de fabricación inviable por los medios disponibles en la universidad.

Para dar solución a este problema se ha optado por la utilización de usar componentes atornillados entre sí, lo que hace más sencillo el montaje entre las distintas partes del bastidor y resultando posible su fabricación en la universidad.

Cabe destacar que la idea es continuar trabajando en este proyecto en cursos futuros por lo que la utilización de elementos atornillados facilita la sustitución futura de partes del bastidor.

Se ha realizado una comparativa entre tubos huecos y piezas macizas de sección rectangular en cuanto a su área y su momento de inercia, que es una propiedad geométrica de la sección transversal de los elementos estructurales.

Para una sección tubular hueca de 30mm de diámetro y un espesor de tubo de 1mm:

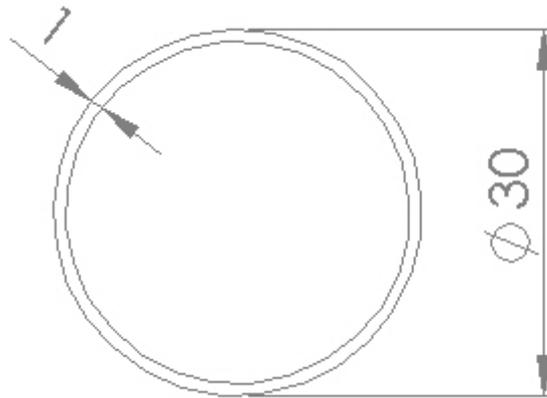


Figura 67: Sección circular hueca

$$A = \pi * (r_1^2 - r_2^2)$$

$$A = \pi * (15^2 - 14^2) = 91,11 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 1/4 * \pi * (r_1^4 - r_2^4)$$

$$I_x = 1/4 * \pi * (15^4 - 14^4) = 9588,93 \text{ mm}^2$$

Para un sección rectangular maciza de 30mm de base y 15mm de altura:

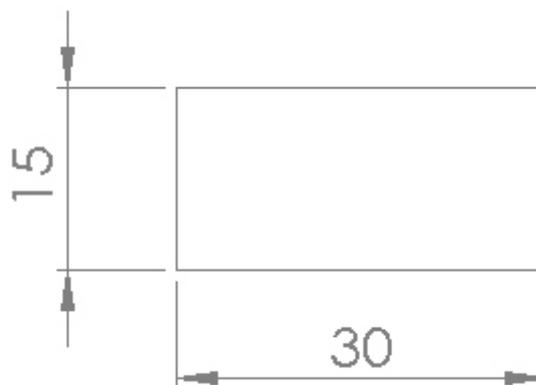


Figura 68: Sección rectangular maciza

$$A = b * h$$

$$A = 30 * 15 = 450 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 1/12 * b * h^3$$

$$I_x = 1/12 * 30 * 15^3 = 8437,5 \text{ mm}^2$$

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

Logramos un momento de inercia semejante con secciones macizas pero usando prácticamente cinco veces más de material, por lo que nuestro bastidor posee una densidad cinco veces mayor que uno realizado con tubos huecos.

Todas las piezas han sido diseñadas para utilizar chapas de aluminio de grosores 15mm y 30mm, facilitando así la adquisición de material y abaratando los costes de fabricación.

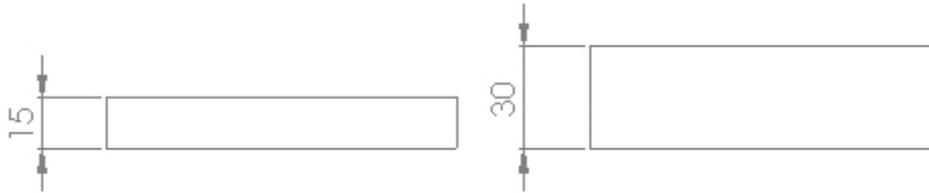


Figura 69: Espesores de chapa

5.1 FABRICACIÓN

Para la fabricación del conjunto de las piezas se establecieron dos tipos de métodos que fueron: *corte por chorro de agua* y mediante el uso de un *centro de mecanizado*, ambos métodos de fabricación se detallan a continuación.

Corte por chorro de agua

Es un proceso de fabricación, mediante el cual se consigue cortar un material, haciendo impactar sobre éste un chorro de agua a gran velocidad que produce el acabado deseado, resultando una herramienta muy versátil y cuya aplicación es extensible a prácticamente todos los trabajos industriales, además al ser un procedimiento de corte en frío resulta especialmente interesante, ya que esta demandado en todas las aplicaciones en las que el material no se pueda ver afectado por el calor.



Figura 70: Corte chorro por agua

El dispositivo consiste en un chorro de agua a presión, cuyo diámetro de la boquilla oscila entre 0,08 mm a 0,45 mm de diámetro, por el cual, sale una mezcla de agua y abrasivo lanzado a una presión muy elevada.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

El motivo de añadirle abrasivo al agua es debido a que un simple chorro de agua no sería capaz de desarrollar cortes como los actuales en los materiales más duros, por ello se le aporta este abrasivo, mezcla de arcillas y vidrios, que dota al sistema de un aumento de posibilidades de corte infinito.

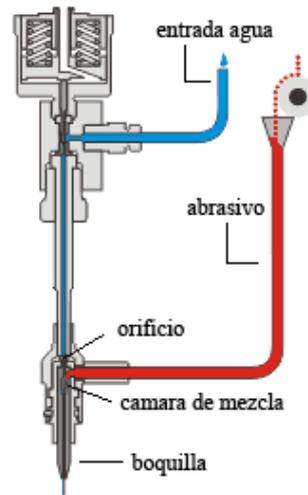


Figura 71: Esquema corte chorro por agua

Uno de los elementos más importantes es la boquilla por la que sale el chorro, de ella depende la cohesión del chorro que condiciona en gran medida la viabilidad técnica de la aplicación, pues si el chorro es cónico se pierde poder de corte, precisión y calidad.

Presión del chorro

La presión del chorro de agua es otra de las características más importantes del proceso, es aportada por un sistema de una bomba dotada con un intensificador de ultra presión que hacen que ésta pueda llegar hasta 4000 bares de presión.

Velocidad de corte

La velocidad de corte depende de factores como la presión de la bomba y la capacidad del intensificador, diámetro de la tobera, cantidad y calidad de abrasivo y del espesor de la pieza. En referencia a valores de velocidad encontramos que todo este sistema de aporte de presión permite que el líquido salga por el orificio a una velocidad de 1000 metros por segundo, siendo un corte lento.

Espesor de la pieza

Se usa desde 5 mm de espesor, donde empieza a ser rentable, hasta espesores de 200 mm, llegando incluso a los 400 mm en aplicaciones especiales. Este chorro de agua puede cortar todo tipo de materiales, desde metálicos hasta blandos como caucho.

Siendo un proceso en el cual la generación de partículas contaminantes es mínima, no aporta oxidación superficial y la generación de viruta no es un problema en este caso.

Máquina de corte

La máquina está dotada de una balsa, sobre la que se proyecta el chorro de agua, y la cual sujeta las piezas mediante una reja que mantiene el material en la superficie de trabajo, pero que permite que la mezcla de agua y el material eliminado se deposite dentro de la misma, evitando así que el líquido proyectado caiga fuera de la zona de corte, e incluso que salpique, pudiéndose reciclar el abrasivo para ser reutilizado de nuevo.



Figura 72: Balsa de agua corte por chorro de agua

El proceso de corte no afecta a los materiales porque no los endurece ni deforma, de esta manera es un método que en diversos casos puede ser más útil que el láser o el plasma cuando los trabajos sea imprescindible un buen acabado.

Ventajas

- Gran variedad de materiales que permite cortar
- Proceso sin aporte de calor, no afectando la zona del material sobre el cual trabaja
- Inexistencia de tensiones residuales debido a que el proceso no genera esfuerzos de corte
- No genera contaminación ni gases
- Permite corta espesores mucho mayores a los del láser

Desventajas

- Es más lento en comparación al corte por plasma
- Limitación de corte por espesor de la pieza, debido a la conicidad del corte

Fabricación mediante centro de mecanizado

Un elevado porcentaje de productos industriales se fabrican mediante procesos de mecanizado por arranque de viruta es decir la forma final de la pieza se obtiene eliminando parte del material mediante herramientas dotadas de uno o varios filos de corte.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

El mecanizado puede llevarse a cabo a partir de una pieza en bruto de geometría simple, que va siendo modificada mediante operaciones sucesivas de arranque de material. En otros casos la pieza de partida ya posee una geometría elaborada al haber sido sometida a operaciones previas, de ser así, la aplicación del mecanizado por arranque de viruta persigue la obtención de determinadas geometrías o especificaciones de diseño como tolerancias dimensionales o acabado superficial, que no pudieron ser alcanzadas mediante las operaciones previas, en este caso, las operaciones de mecanizado pasan a ser operaciones secundarias.



Figura 73: Mecanizado

El centro de mecanizado es el resultado de la evolución de la máquina herramienta de fresar, en un contexto donde se ha precisado aumentar la productividad, la flexibilidad y la precisión, al tiempo que se mejoraban las condiciones de seguridad de los trabajadores, ayudado por la aparición de la electrónica.

Un centro de mecanizado es una máquina herramienta de conformado por arranque de material, es decir una máquina no portable que opera con la ayuda de una fuente de energía externa, capaz de modificar la forma del material o pieza a mecanizar mediante el arranque de pequeñas porciones del mismo o virutas, de forma continua o discontinua.



Figura 74: Centro de mecanizado

Las características de un centro de mecanizado para diferenciarlo de otro tipo de máquinas son las siguientes:

- Está dotado de un control numérico
- Puede realizar otras operaciones de mecanizado además del fresado
- Dispone de un cambiador de herramientas automático

Tecnología CNC (Control Numérico Computarizado)

La primera de estas propiedades esenciales significa que los centros de mecanizado son el producto de la revolución tecnológica que ha supuesto en el mundo de la mecanización la introducción de la tecnología del control numérico. No existen centros de mecanizados anteriores a la tecnología del control numérico.

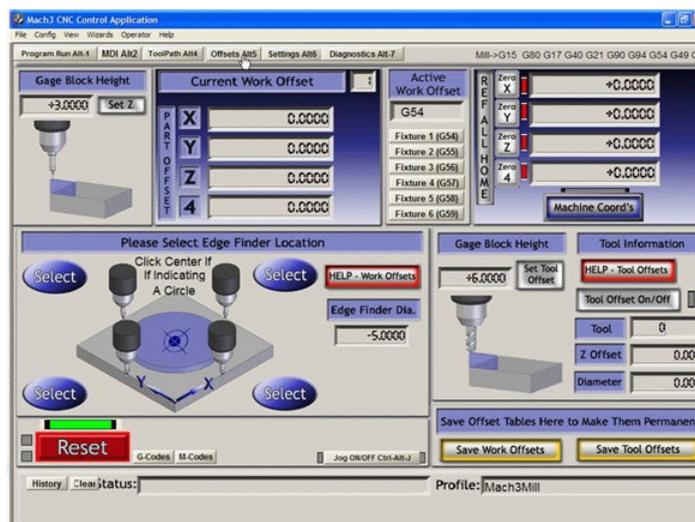


Figura 75: Programa CNC

Puede realizar otras operaciones de mecanizado además del fresado

La transformación de la fresadora clásica en un centro de mecanizado ha sobrevenido como consecuencia de dotarla de la potencialidad para desarrollar operaciones de trabajo que tradicionalmente se realizaban en otro tipo de máquinas. Es el caso del taladrado, y del roscado fundamentalmente. Este tipo de operaciones no son cinemática y conceptualmente hablando distintas del fresado, dado que aunque tengan implicaciones mecánicas y tecnológicas bien distintas, todas ellas se ejecutan mediante un movimiento de corte circular, con la ayuda de una herramienta rotativa.

Esto es lo que hizo posible que se integrasen este tipo de operaciones en una misma máquina. Por lo tanto, un centro de mecanizado es una máquina herramienta dotada de control numérico que permite realizar distintas operaciones de mecanizado como fresado, taladrado y roscado.

El fresado es una operación de mecanizado que consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos denominada fresa, que ejecuta movimientos de avance programados en casi cualquier dirección de los tres ejes.

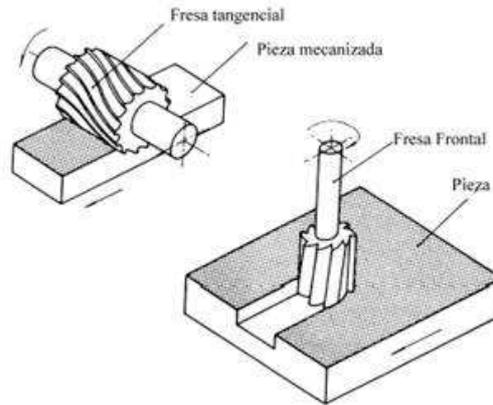


Figura 76: Operación de fresado

El taladrado es una operación de mecanizado que consiste en producir agujeros cilíndricos en el material a mecanizar, utilizando como herramienta una broca.

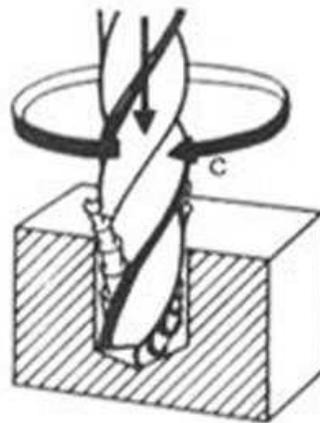


Figura 77: Operación de taladrado

El roscado es una operación de mecanizado que consiste en la mecanización helicoidal de un agujero previamente realizado en un material.

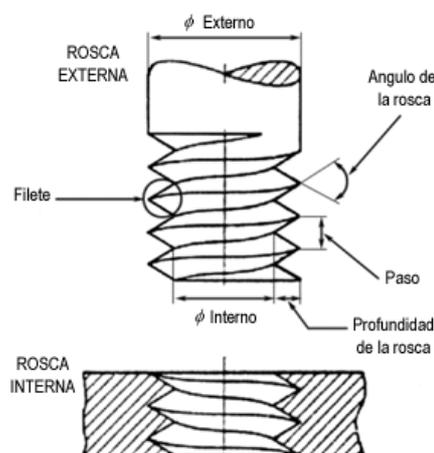


Figura 78: Operación de roscado

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

En este sentido se debe establecer la diferencia entre centros de mecanizado y fresadoras de control numérico, dado que éstas últimas son máquinas herramienta que si están dotadas de control numérico pero sólo están destinadas a realizar operaciones de fresado.

Dispone de un cambiador de herramientas automático

Disponen de un sistema que facilita el cambio automático de las herramientas que permitan efectuar las distintas operaciones posibles. Este sistema de cambio de herramienta está gobernado por el control numérico de la máquina. Los sistemas de cambio de herramienta responden a conceptos estructurales, necesidades y soluciones de diseño bien distintas, pero en cualquier caso deben asegurar la posibilidad de efectuar un cambio de herramienta en el transcurso de ejecución de un programa pieza, sin la necesidad de intervención por parte del operario.



Figura 79: Mecanismo cambio de herramienta

Los centros de mecanizado poseen las siguientes características:

- Son reconfigurables, por lo que pueden cambiar rápidamente de configuración para realizar diferentes tareas de mecanizado sobre una pieza
- La flexibilidad y versatilidad debida al alto grado de automatización las hace capaces de realizar diversas operaciones de mecanizado de una pieza
- La uniformidad en la producción, que es importante en las producciones en serie
- Alta velocidad de producción, ya que realizan gran cantidad de operaciones de forma automática sobre la pieza
- Buen acabado superficial, lo que las hace aptas para dar forma final a las piezas fabricadas

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

A continuación se especifica que método de fabricación ha aplicado a cada pieza diseñada:

PIEZA	CENTRO MECANIZADO			
	CORTE POR CHORRO DE AGUA	FRESADO	TALADRADO	ROSCADO
<i>Bastidor</i>	SI	NO	SI	SI
<i>Sujeción horquilla</i>	NO	SI	SI	SI
<i>Unión bastidor-brazo trasero</i>	NO	SI	SI	SI
<i>Brazo trasero</i>	SI	NO	SI	SI

Tabla 13: Métodos de fabricación de piezas diseñadas

Obteniendo un resultado semejante al siguiente:



Figura 80: Representación piezas fabricadas

5.2 MONTAJE

Una vez fabricado el conjunto de las piezas que componen el cuadro deben ser atornilladas las distintas partes que componen el cuadro.

Es aconsejable proceder a un apretado progresivo de tornillos desde los más interiores hacia fuera.

Diseño y construcción de una bicicleta de transmisión eléctrica

No es necesario un valor de par de apriete determinado para lograr la condición de contacto ajustado, se considera que es el correspondiente al proporcionado por un operario utilizando una llave normal sin prolongador.

Montaje de los componentes atornillados

En primer lugar se debe atornillar las dos piezas que forman la sujeción de la horquilla, para así formar un único conjunto. Son unidas entre sí mediante dos tornillos de M4X45mm como se aprecia en la siguiente imagen:



Figura 81: Montaje sujeción horquilla

Obteniendo el siguiente resultado:



Figura 82: Resultado montaje sujeción horquilla

A continuación se debe atornillar este conjunto al bastidor mediante seis tornillos M6X20 mm:



Figura 83: Montaje sujeción horquilla - bastidor



Figura 84: Resultado montaje sujeción horquilla - bastidor

La siguiente pieza a atornillar al bastidor es la unión trasera, esta unión se realiza mediante dos tornillos M6X40mm:



Figura 85: Montaje unión trasera - bastidor

Obteniendo el siguiente resultado:



Figura 86: Resultado montaje unión trasera - bastidor

A continuación y para finalizar el montaje del cuadro se deben atornillar los dos brazos traseros. La unión se realiza mediante tres tornillos por brazo de M6X20mm:



Figura 87: Montaje brazo trasero - unión trasera

Obteniendo el siguiente resultado:



Figura 88: Resultado montaje brazo trasero - unión trasera

Debe repetirse la misma operación para el otro brazo trasero gemelo:



Figura 89: Resultado final del montaje del cuadro

Montaje elementos comerciales

Una vez montado el cuadro se deberán acoplar las piezas comerciales para el correcto funcionamiento de la bicicleta, estas piezas se acoplan al cuadro como en el cualquier otra bicicleta disponible en el mercado, por lo que no se especifica su montaje, estas piezas son las siguientes:



Figura 90: Rueda delantera 26"



Figura 91: Rueda trasera con hub-motor



Figura 92: Manillar, potencia y puños



Figura 93: Dirección horquilla



Figura 94: Horquilla delantera



Figura 95: Manetas de freno



Figura 96: Freno delantero V-brake



Figura 97: Sillín y tija de sillín



Figura 98: Pedales y bielas

El resultado final del conjunto con los elementos comerciales es el siguiente:



Figura 99: Resultado final del conjunto

6. CONCLUSIONES

Una vez que se ha finalizado el diseño del cuadro de la bicicleta se puede concluir que el método de fabricación no es el más apropiado, siendo la utilización de tubos huecos el mejor sistema para este fin, aunque no hay que olvidar que el propósito de este proyecto era elaborar un prototipo que pudiera fabricarse con los medios disponibles.

Con la simulaciones se ha demostrado que el peso del cuadro diseñado es superior al de una bicicleta convencional siendo este de 6,3 Kg.

En cuanto al rendimiento del sistema eléctrico de potencia de la bicicleta queda claro que está altamente dominado por ambas máquinas eléctricas, en las que un diseño específico para esta aplicación es requerido debido a que el generador diseñado tiene un rendimiento del 88% y el motor comercial adquirido no supera el 80%, haciendo que el rendimiento total del sistema eléctrico no sea el óptimo. De todas formas el sistema eléctrico nos permite implementar un sistema de recuperación de energía durante las frenadas el cuál mejora el rendimiento global del sistema.

En cuanto al mantenimiento de este sistema de transmisión, este es mucho más complejo, aunque las probabilidades de fallo son mucho más reducidas que las de una transmisión mecánica de una bicicleta convencional.

El coste de la implementación de este sistema es superior al de una bicicleta común, aunque cabe destacar que este sistema nos aporta nuevas características las cuáles son imposibles de lograr con los sistemas mecánicos existente en las bicicletas de hoy en día.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. E. Agency, European Union CO2 emissions: different accounting perspectives. 2013.
- [2] B. University. <http://batteryuniversity.com/parttwo-53.htm>.
- [3] Tejvan, "The growth of bike sharing schemes across globe," IBM Journal of Research and Development, Octubre2013.
- [4] UNE-EN 14764. Bicicletas de paseo, requisitos de seguridad y métodos de ensayo. Noviembre 2006.
- [5] Enrique Rodríguez Díaz, "Design and simulation of an electrical power system of a pure electric bicycle", Enero 2014.
- [6] ASHBY M, F. "Materials Selection in Mechanical Desing", Ed Pergamon Press, Oxford, 1992, 309p.
- [7] Fernando Álvarez González, "High efficiency electric generator for chain-less bicycle", Julio 2014.

8. ANEXOS

8.1 ANEXO I. PIEZAS DISEÑADAS MEDIANTE SOLIDWORKS

Ver carpeta adjunta.

8.2 ANEXO II. ENSAYOS MEF MEDIANTE SOLIDWORKS

Ver carpeta adjunta.

8.3 ANEXO III. PLANOS MÉCANICOS

Ver carpeta adjunta.

8.4 ANEXO IV. PRESUPUESTO

Ver carpeta adjunta.