



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

ESTUDIO Y DISEÑO DE NUEVAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO CON TRENES EPICICLOIDALES

Grado en Ingeniería Mecánica

30/06/2020

David Hormigo Sebastià

Director: Javier Freire

Presidente del tribunal: José Antonio Ortiz

Vocal del tribunal: Carlos Ríó

0. INTRODUCCIÓN

ABSTRACT O RESUMEN

El propósito de este estudio es múltiple: por un lado, ampliar el material disponible de prácticas para los alumnos y, por otro lado, replantear la propuesta de prácticas que los alumnos deben seguir en las sesiones de laboratorio.

Para ello, se ha analizado el modelo actual de laboratorio, se ha desarrollado un nuevo modelo con las referencias de este y se ha preparado un guion de prácticas actualizado a la corriente actual de educación más ventajosa, junto con un manual de prácticas para aclarar posibles dudas respecto a su uso.

En última instancia, se ha valorado la solución definitiva en aspectos como su impacto económico y ambiental para verificar que era aceptable.

This study done is multi-purpose. On the one hand, to expand the available material for the student practices and, on the other hand, to review the exercise script which the students should follow during the laboratory sessions.

To accomplish that, we have analysed the current lab unity, in order to develop a new unity based on the references taken and prepare a new exercise script updated to the current education trend. Moreover, it has been written a new laboratory manual, so as to face possible doubts and difficulties.

Finally, the new model has been assessed economic and environmentally to verify that it was an acceptable disposal solution.

0. INTRODUCCIÓN

AGRADECIMIENTOS

Reconocimientos

Querría agradecer a un conjunto de personas porque sin ellos este proyecto no hubiera salido adelante. No sería justo si no recibieran su reconocimiento aquellos que me han sufrido o me han soportado especialmente los últimos meses, que en definitiva se han tornado los meses de mayor intensidad.

También a todos aquellos compañeros y profesores que han ofrecido su ayuda y sus conocimientos para resolver dudas y consultas de cualquier ámbito, sobretodo por la situación excepcional de confinamiento de los últimos meses.

Agradecimientos concretos

- En primer lugar, a toda la familia, incluyendo padres, hermanos, cuñados e incluso al joven Biel, porque la situación excepcional de reclusión ha requerido un extra de apoyo y motivación desde casa que ellos han brindado ampliamente.
- En segundo lugar, tanto Javier como Carlos, los dos tutores del proyecto, que han tenido que hacer correcciones a horas y momentos habitualmente más de descanso que de trabajo. Especialmente a Carlos, también, por haber dado la propuesta del trabajo allá por octubre y las indicaciones y correcciones constantes para ir enderezando el trabajo.
- En cuanto a amigos, no sería justo olvidar el apoyo recibido por Aarón y Tamar, porque cuando han llegado momentos duros han animado y han dado su apoyo para recordar la poca distancia que quedaba hacia la meta, ofreciendo su ayuda incluso para cuando era necesario.
- Por último, también a Chenkai, a Javier, a Roger y a Víctor, compañeros de clase que han ido dando aclaraciones con respecto a ciertos detalles técnicos del proyecto debido a su experiencia laboral.

0. INTRODUCCIÓN

0.1 OBJETO

El objeto de este proyecto es el diseño de material docente para la realización de las prácticas de laboratorio de la asignatura Teoría de Máquinas y Mecanismos, impartida en el Grado en Tecnologías Industriales. Para poder llevar a cabo satisfactoriamente este trabajo, se procederá a conocer qué se quiere rediseñar, en este caso, un tren de engranajes epicicloidales de dos etapas.

Como introducción al lector, se comentarán las distintas aplicaciones y el funcionamiento de este mecanismo a lo largo de la historia. Una vez realizada esta contextualización, así como de un estudio de mercado de productos similares de mercado, se procederá a la parte central de este proyecto, el diseño y el posterior análisis para la fabricación del modelo.

Además, se realizará una propuesta de guion de prácticas a seguir durante las sesiones de laboratorio. Como colofón final, se redactará un manual de prácticas para los alumnos, junto con un manual de instrucciones con las posibles reducciones y multiplicaciones posibles del artefacto necesarias para la realización de la práctica.

0.2 ALCANCE

Para llevar a cabo este estudio, se afrontarán diferentes etapas que marcarán la estructura final de este documento escrito. Primeramente, se planteará el análisis histórico con algunas aplicaciones del elemento a estudiar -los trenes de engranajes planetarios- para conocer mejor el elemento con el que se va a trabajar y optimizar el resultado final.

En una segunda etapa, se estudiará y analizará un modelo ya existente para tomar ciertas referencias en cuanto a medidas, grosores, posibles materiales y alternativas. Así, se planteará la incorporación de nuevos elementos para generar más variantes de entrada y salida, para hacer más didáctica la práctica.

Esta etapa vendrá seguida de una más creativa, en la que se diseñarán los diferentes componentes con un programa de modelado 3D, teniendo presente el punto anterior con todas las alternativas y variaciones a realizar. Con esto, procederá a la preparación de un guion de prácticas adaptado al modelo diseñado.

En la cuarta etapa, se procederá a analizar el posible impacto del proyecto, tanto a nivel económico como ambiental, con tal de valorar su viabilidad. Finalmente, y como último aspecto, se procederá a redactar un manual de instrucciones del artilugio construido, junto con un guion de prácticas para que los alumnos efectúen las prácticas plenamente.

0.3 REQUERIMIENTOS

Desde el departamento de Ingeniería Mecánica, de la Escuela Industrial de Terrassa, el coordinador nos ha fijado las siguientes condiciones para efectuar este proyecto:

-El proyecto no debe sobrepasar los 3000 € en cuanto a coste de materiales se refiere. Los posibles costes de ingeniería derivados del proyecto, se valorarán por separado.

-Puesto que los productos resultantes serán material docente, se espera que el material sea construible utilizando maquinaria disponible en los talleres de la universidad, como fresadoras, tornos, impresoras 3D o cortadoras láser.

-Por el mismo motivo que la condición anterior, sería valorable algún tipo de soporte o elemento ergonómico para transporte y a la vez mantenerlo estable durante la realización de las prácticas.

-Se redactarán documentos con tal que los estudiantes hagan uso de este material correctamente, y puedan seguir las prácticas paso a paso con un manual de instrucciones.

0.4 JUSTIFICACIÓN Y UTILIDAD

Este proyecto tiene como origen el estado del material del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Terrassa. Este material lleva años a disposición de los alumnos en las prácticas de la asignatura de Teoría de Máquinas. Sin embargo, pese a los grupos reducidos de prácticas frente a los grupos grandes de teoría, no hay material para que todos los alumnos hagan la misma práctica a la vez.

Por ello, se planteó la posibilidad de comprar más material idéntico al existente. Desgraciadamente, pese a que la empresa sigue funcionando con normalidad, el material que se ofrecía era de un coste elevado. Como segunda razón, y quizás más importante, es que su oferta de productos ha cambiado, dejando de ser viable la opción de comprar, puesto que el producto de interés ya no está en catálogo.

Por ello, surge la necesidad de diseñar y fabricar el material por parte de la universidad con tal de cubrir esta necesidad. Así, surge este proyecto, abierto además a posibles variaciones con tal de aprovechar al máximo un modelo de prácticas y, a la vez, hacer uso también de la maquinaria y los servicios ya disponibles en el taller.

A su vez, el hecho de fabricar el máximo número de piezas y, por otro lado, comprar todas aquellas que puedan ser normalizadas, disminuye los costes finales y, además, permite la posibilidad de, en caso de daños o pérdida de material, tener una copia electrónica para volver a fabricarlo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES	12
1.1 Concepto de engranaje epicicloidal	12
1.2 Primeras aplicaciones de este dispositivo	12
1.3 El “ <i>Boom</i> ” de la industria automotriz. Las cajas de cambio	13
1.4 Aplicaciones actuales en otros campos	18
2. ESTUDIO DEL MODELO EXISTENTE EN EL LABORATORIO	21
2.1 Estudio de los componentes del modelo.	22
2.2 Desarrollo de la práctica con el modelo existente.	23
3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES	26
3.1 Módulo de transmisión	26
3.2 Bancada y soporte.....	31
3.3 Ejes auxiliares para las distintas relaciones.....	36
3.4 Conjuntos de brazos auxiliares.....	39
4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO	41
4.1 Introducción teórica a la práctica	41
4.2 Propuesta de trabajo de prácticas	45
4.3 Justificación de la propuesta	46
5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO	48
5.1 Presupuestos de Ejecución Material (PEM).....	48
5.2 Resumen del PEM.....	52
6. IMPLICACIONES AMBIENTALES	53
6.1 Proceso de fabricación	53
6.2 Ciclo de vida útil	54
6.3 Proceso de reciclado	55
6.4 Coste energético de generar el proyecto	56
7. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN	58
7.1 Fase 1: Prediseño	59

0. INTRODUCCIÓN

7.2 Fase 2: Diseño	60
7.3 Fase 3: Post-Diseño.....	60
7.4 Seguimiento de la programación	61
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
8.1 Conclusiones.....	62
8.2 Recomendaciones.....	64
9. BIBLIOGRAFIA	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Representación de engranaje epicicloidal con sus componentes	12
Ilustración 2. El Mecanismo de Anticitera, el primer precursor de los engranajes planetarios.....	13
Ilustración 3. Benz Patent-Motorwagen, el primer vehículo de combustión interna	14
Ilustración 4. Modelo de caja de cambios de Wilson.....	15
Ilustración 5. Caja de Cambios Simpson.....	16
Ilustración 6. Modelo del cambio de Ravigneaux	17
Ilustración 7. Mecanismo diferencial en línea recta.....	18
Ilustración 8. Mecanismo diferencial en giro.....	19
Ilustración 9. Cambio interno de 3 velocidades en las bicicletas.....	20
Ilustración 10. Modelo actual del laboratorio, de TecQuipment.....	21
Ilustración 11. Vista del piñón.....	27
Ilustración 12. Vista del satélite	28
Ilustración 13. Vista de la corona	29
Ilustración 14. Vista del chasis.	30
Ilustración 15. Vista del eje satélite	31
Ilustración 16. Vista de la Placa principal	32
Ilustración 17. Pata de la placa principal	33
Ilustración 18. Vista del disco graduado.....	34
Ilustración 19. Vista del eje de enganche	35
Ilustración 20. Vista del Tapón roscado.....	35
Ilustración 21. Vista del eje de enganche de soles.....	36
Ilustración 22. Vista del Eje con mango ensamblado, compuesto por 4 piezas	37
Ilustración 23. Vista del eje fijador de la corona	37
Ilustración 24. Eje de fijación de satélites del brazo	38
Ilustración 25. Vistas del eje roscado (izquierda) y el tapón (derecha)	38
Ilustración 26. Conjunto auxiliar 1	39
Ilustración 27. Conjunto auxiliar 2	40
Ilustración 28. Metacrilato auxiliar	40
Ilustración 29: Esquema del tren epicicloidal más simple.....	41
Ilustración 30: Tren epicicloidal con 4 satélites	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relaciones de velocidad a realizar en las prácticas de laboratorio con el modelo actual.	24
Tabla 2: Características de los engranajes diseñados.	26
Tabla 3: Relaciones de velocidad a observar.....	44
Tabla 4: Datos de las ruedas del tren epicicloidal	45
Tabla 5: Tabla de velocidades a rellenar por el alumno (cálculo analítico).	45
Tabla 6: Tabla de velocidades a rellenar por el alumno experimentalmente	46
Tabla 7: Tabla de presupuesto del Módulo A.....	48
Tabla 8: Tabla de presupuesto del Módulo B.....	49
Tabla 9: Tabla de presupuestos del Módulo C	50
Tabla 10: Tabla de presupuestos del módulo D	51
Tabla 11: Tabla Resumen del PEM.....	52
Tabla 12: Planificación global del proyecto	58
Tabla 13: Planificación desglosada de la Fase 1	59
Tabla 14: Planificación desglosada de la Fase 2	60
Tabla 15: Planificación desglosada de la Fase 3	60
Tabla 16: Planificación de seguimiento del proyecto.....	61

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

1.1 Concepto de engranaje epicicloidal

Se entiende por engranaje epicicloidal al sistema de engranajes compuesto por uno o más engranajes externos -llamados planetas- que giran alrededor de un engranaje central -denominado sol-. Estos planetas se montan sobre un brazo o chasis, que también puede rotar alrededor del engranaje central, además de un engranaje externo o corona que engrana con los planetas. En la figura 1, se puede apreciar una representación de todo el conjunto, indicando cada pieza que forma el montaje, pintados de diferentes colores para distinguirlos con mayor claridad.

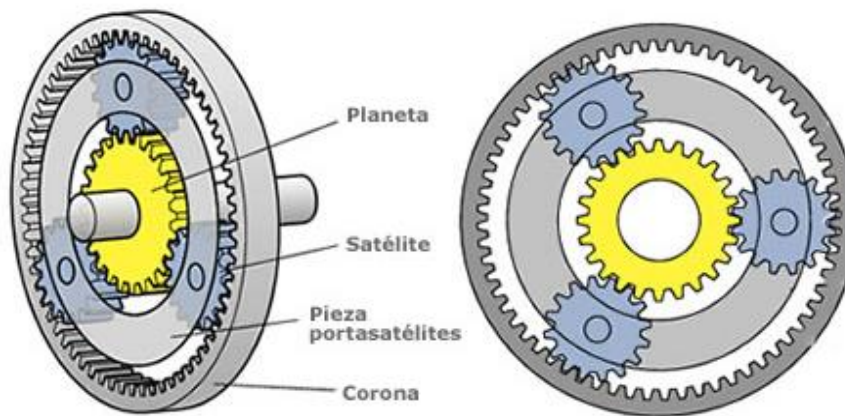


Ilustración 1. Representación de engranaje epicicloidal con sus componentes

Si bien hoy en día es un mecanismo muy común, especialmente en la industria de la automoción, su origen se remonta a la Antigua Grecia.

1.2 Primeras aplicaciones de este dispositivo

El primer modelo de engranaje epicicloidal data alrededor del siglo I aC. Denominado como Mecanismo de Anticitera, fue la culminación práctica de los estudios realizados por científicos griegos. Estos pretendían definir de forma precisa los movimientos de los planetas y los diferentes astros -como, por ejemplo, La Luna-. Pese al deterioro evidente que se aprecia en la ilustración 2, fue un artefacto muy avanzado y vanguardista para aquel momento.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES



Ilustración 2. El Mecanismo de Anticitera, el primer precursor de los engranajes planetarios

Pese a este avance tan temprano en la historia, pasaron varios siglos hasta la creación de otras máquinas relevantes que incorporaran este conjunto. Así, no fue hasta el siglo XI dC cuando un ingeniero árabe de la península Ibérica, reinventó el engranaje epicicloidal con su reloj de agua, cuyo complejo mecanismo incluía engranajes planetarios.

Sin embargo, uno de los desarrollos más importantes llegó de la mano de Agostino Ramelli, un ingeniero italiano que inventó la rueda de libros en 1588. Esta era una librería rotatoria tal que permitía la lectura de varios libros desde un mismo lugar sin necesidad de moverse, con el movimiento de una rueda hidráulica para ir pasando los libros.

Pero no fue hasta finales del siglo XIX y principios del XX cuando, en los albores de la industria automotriz, los trenes de engranajes epicicloidales empezaron a desarrollarse a mayor grado hasta alcanzar su mayor apogeo.

1.3 El “Boom” de la industria automotriz. Las cajas de cambio

La patente del primer automóvil de combustión interna con gasolina la ostentó el alemán Karl Benz en 1885, con el denominado como Benz Patent-Motorwagen, el cual se puede apreciar en la figura 3. Otros alemanes, como Daimler y Maybach desarrollaron también su propio automóvil hacia 1889.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

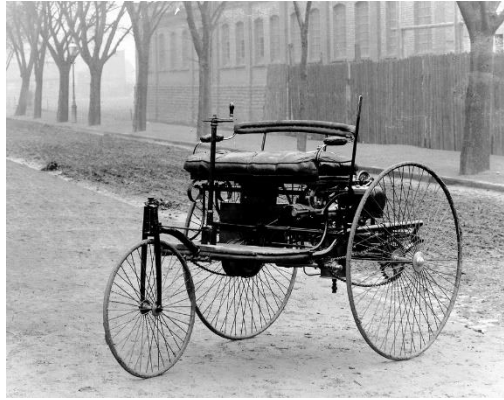


Ilustración 3. Benz Patent-Motorwagen, el primer vehículo de combustión interna

Pero los trenes epicicloidales empezaron a hacer aparición unos pocos años más tarde. Un londinense llamado Fred Lanchester, comenzó a investigar en 1889 los engranajes epicicloidales, con tal de poder aplicarlos en los automóviles. En 1895 sus estudios empezaron a manifestarse públicamente, cuando finalizó la construcción de su primer vehículo, pese a que no rodó hasta 1896. Este incorporaba una caja de cambios epicicloidal revolucionaria, la cual dotaba al vehículo de dos velocidades más la marcha trasera.

A partir de aquí, los automóviles construidos en el Viejo Continente, fueron evolucionando hacia una transmisión manual, mientras que, al otro lado del Atlántico, la industria americana apostó por la caja de cambios automática con trenes epicicloidales. Como claro ejemplo de ello, el Ford T -el primer vehículo producido en cadena, comercializado desde 1908- incorporaba una caja de cambios epicíclica de dos velocidades y una marcha trasera.

1.3.1 Cambio Wilson

Continuando la investigación y el progreso que hubo en las décadas posteriores en el campo de las transmisiones -con la I Guerra Mundial entremedio-, en 1928, Walter G. Wilson, un ingeniero británico, sacó a la luz su caja de cambios. Estas cajas de cambios presentaban una palanca preselección que activaba un pedal suplementario -pedal de cambio de marcha- para accionar el cambio al momento deseado.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

Las innovaciones de Wilson fueron, principalmente, dos. Por un lado, contaba con diversos embragues, y por otro planteó una serie de engranajes epicíclicos acoplados de tal forma que cada tren de engranajes componía las diferentes marchas, y un embrague cónico para la marcha superior directa y otro epiciclo para la marcha atrás. En una época donde eran habituales las cajas de tres velocidades, la “caja de cambios Wilson” proporcionaba cuatro, obteniendo unas ratios de cambio más bajos que la hacían muy interesante para los vehículos deportivos.

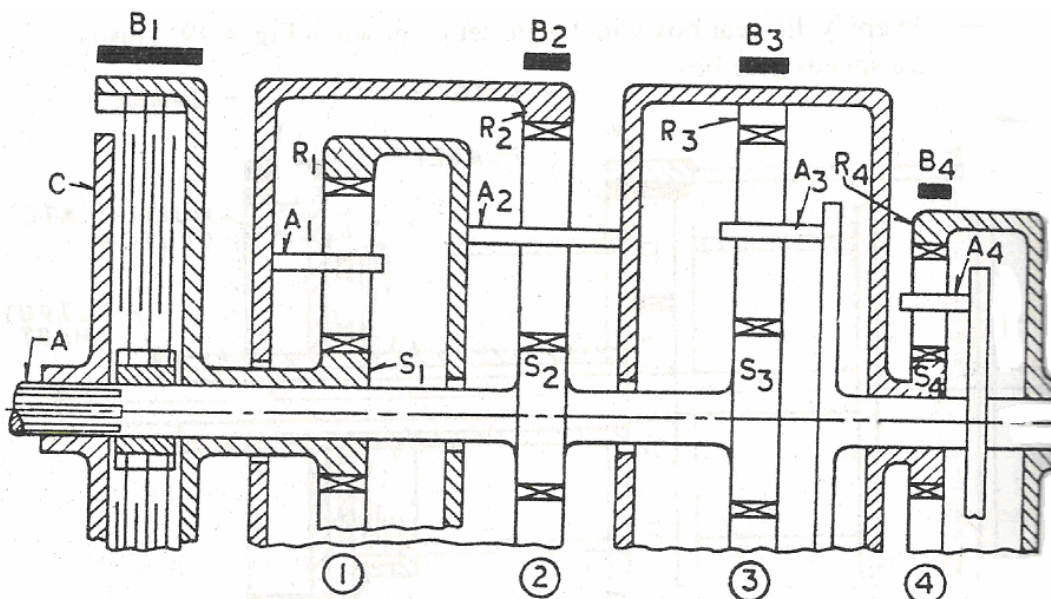


Ilustración 4. Modelo de caja de cambios de Wilson.

En la ilustración 4 se puede apreciar un esquema con la indicación de cada marcha a través de los números inferiores. La 4 representa la marcha trasera. Cada una de estas se activa frenando el elemento A correspondiente (Por ejemplo, para la primera velocidad, se debe frenar A1, y así sucesivamente).

1.3.2 Cambio Simpson

Después de las modificaciones que se produjeron en las cajas de cambios Wilson, especialmente en la década de 1940 con la II Guerra Mundial, en el año 1950 se presentó otra caja de cambios revolucionaria mediante engranajes planetarios, la cual fue patentada por la Ford Motor Company en 1953.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

La particularidad de esta caja de cambios se encontraba en que ofreciendo una transmisión automática de tres velocidades -a través de tres trenes de engranajes planetarios en serie- dos de estos trenes eran idénticos y estaban conectados con un sol común. El hecho de utilizar una gran mayoría de piezas iguales para la marcha delantera y la trasera, resultaba en una transmisión mucho más barata en fabricación por la reducción de costes de herramientas. Este tipo de cambio también se comercializó en la década de 1970 en Europa, de la mano de Daimler-Benz para sus automóviles Mercedes-Benz.

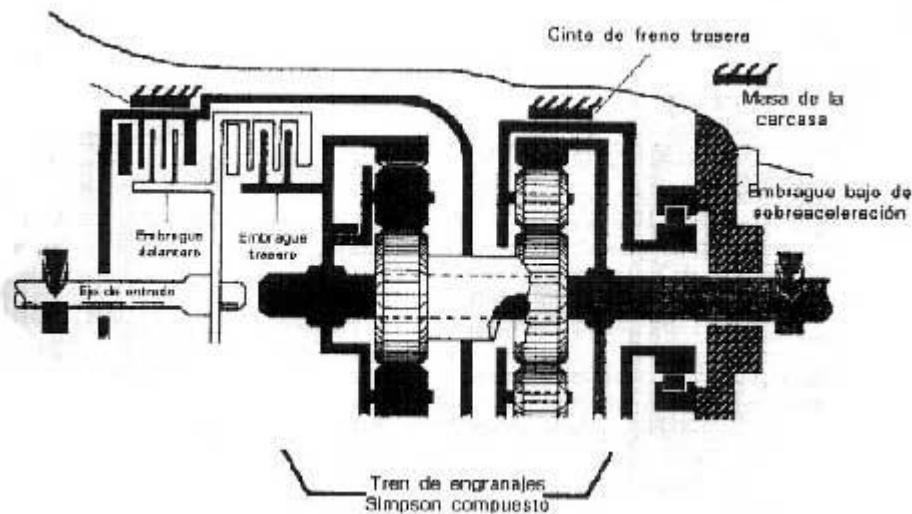


Ilustración 5. Caja de Cambios Simpson

En la ilustración 5, se puede apreciar una caja de cambios Simpson, con los elementos auxiliares necesarios indicados. Se puede ver también el tamaño idéntico de los diferentes trenes, acoplados por el sol común, lo cual ocasionaba estos costes menores, como se ha comentado.

1.3.3 Cambio Ravigneaux

Paralelamente al modelo Simpson, Pol Ravigneaux presentó la solicitud de patente en 1949 para su modelo de caja de cambios. Este representaba una gran diferencia en cuanto a forma y funcionamiento con respecto a los modelos existentes en el momento. El invento original consistía en dos trenes de engranajes planetarios en un único portaplanetas. Así, contenía dos soles, dos coronas y dos conjuntos de planetas para un solo chasis. Con esto, logró hacer un cambio más pequeño, ligero y más barato, puesto que el brazo es

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

generalmente el componente más grande y más costoso. Se puede apreciar este brazo diferente respecto a los modelos anteriores en la ilustración 6.

Con el paso de los años, en 1992 se presentó una variación de este cambio. La conocida como caja de cambios Lepelletier conectaba otro tren epicicloidial al modelo Ravigneaux, dando tres grados de libertad al mecanismo. Este modelo

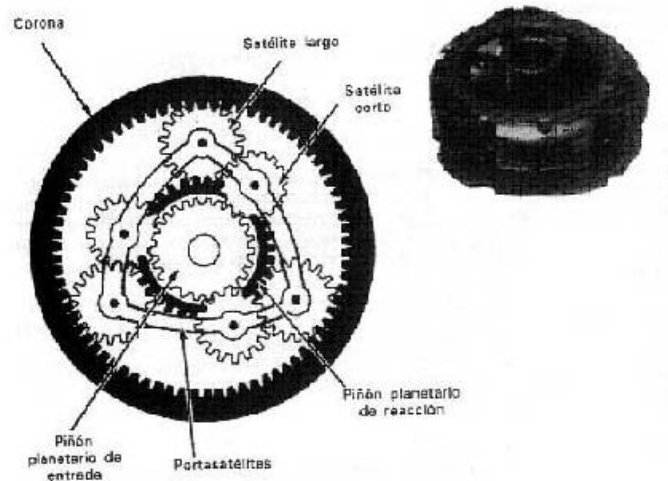


Ilustración 6. Modelo del cambio de Ravigneaux

se siguió desarrollando hasta llegar a casos actuales de cajas de cambios automáticas de siete velocidades, asentándose como la tercera tipología de cajas de cambios automáticas -todas mediante engranajes planetarios- junto a las ya comentadas de Simpson y Ravigneaux.

Otra aplicación muy común, dentro también de la automoción, es el de los mecanismos diferenciales, el elemento mecánico que permite que las dos ruedas de un vehículo puedan girar a distinta velocidad, sea para un lado, o para el otro.¹

Pero los engranajes planetarios no se han aplicado únicamente en automóviles. Debido a su gran capacidad para transmitir esfuerzos se han aplicado en maquinaria pesada, en los últimos años, también se están aplicando en el cambio de las bicicletas, pese a que por dimensiones y necesidades puede ser algo totalmente opuesto a lo que se ha mencionado hasta ahora.

¹ Nash, Frederick C. (18 de septiembre de 1980) [1970]. Fundamentos de mecánica automotriz [Automotive fundamentals]. Traducido por Ing. Juan José Blanco (12 edición). México .F.: Editorial Diana. p. 293.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

1.4 Aplicaciones actuales en otros campos

Así, en este apartado final se comentarán dos aplicaciones actuales más de los engranajes planetarios.

1.4.1 El mecanismo diferencial de los automóviles

Posterior al desarrollo de las cajas de cambio automáticas con engranajes epicicloidales, se empezó a hacer uso de este mismo mecanismo para el diferencial de giro de este medio de transporte. Así, en 1897 se presentó al mundo el primer automóvil de vapor con uso del diferencial en las ruedas de giro, de la mano del australiano David Shearer. Este invento, se fue adoptando en gran medida en la mayoría de vehículos que salían al mercado, fuera en el continente que fuera, debido a su gran beneficio.

Y es que, anteriormente, las ruedas se montaban de forma fija sobre el eje, de tal forma que en las curvas, una de las dos ruedas gira de forma inapropiada y desestabilizaba el vehículo. Con este mecanismo, en cambio, la tracción del motor actúa por igual en las dos ruedas sin perder la fijación sobre el eje.

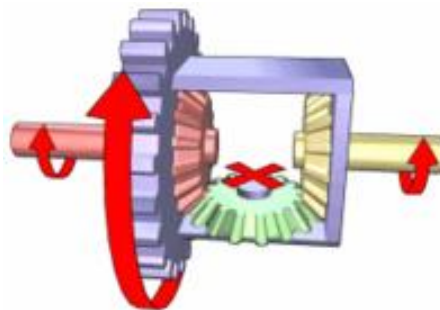


Ilustración 7. Mecanismo diferencial en línea recta

Ateniéndonos a la ilustración 7, su funcionamiento es el siguiente. Suponiendo el caso más común, se dispone de tres engranajes cónicos en forma de “U” (en casos de mucha carga, se dispone de cuatro). La corona (lila) gira solidaria con el chasis, causando que el planeta (verde) tenga un movimiento de rotación sobre sí mismo -por los dos soles (rojo y amarillo) también con un giro- y otro de translación -según gira la corona-. Así, el movimiento de translación será a la misma velocidad que la corona, con los dos palieres, rojo y amarillo, girando a la misma velocidad.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

En el momento en el que llega un giro, sea en el lado que sea, uno de los dos soles tendrá un giro más lento, mientras que el otro, lo hará a mayor velocidad. Gracias al planeta, que actuará de compensador de velocidades, uno girará más rápido y el otro más despacio, con la aceleración de un sol idéntica en valor a la desaceleración del otro sol. Se pueden ver los movimientos de forma sencilla en la ilustración 8, así como las diferencias frente a la ilustración 7 cuando no hay variaciones de dirección.

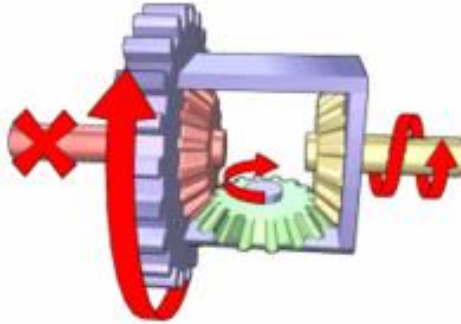


Ilustración 8. Mecanismo diferencial en giro

1.4.2 Cambio de marchas de bicicleta

Otra aplicación en la que se están utilizando los engranajes epicicloidales, más allá del mundo de la automoción, es el cambio de marchas de la bicicleta. Podríamos dividir este sistema de cambio según si se hace de forma externa - mediante platos y piñones conectados a través de una cadena-, o bien de forma interna, que es el caso en el que se emplea el tren de engranajes.

A nivel global, el cambio externo es el más extendido, teniendo en cuenta que históricamente el cambio interno era de tan sólo tres posibles marchas, aunque en los últimos años han ido reapareciendo en el mercado tras los lanzamientos de Shimano de once velocidades (2010), o incluso el de la empresa alemana Rohloff, introducido en 1998 y que alcanza las 14 velocidades. En estos casos, se emplean varios trenes de engranajes planetarios en serie, aunque también hay algunos ejemplos del mercado que hacen un híbrido entre cambio interno y externo.

1. ESTADO DEL ARTE DE LOS ENGRANAJES EPICICLOIDALES

Pese a estos casos, el funcionamiento básico del cambio interno de tres velocidades es el siguiente, tomando como referencia la ilustración 9 (El sol, en amarillo; los planetas en azul; el chasis, en verde; y la corona, en rojo). En los tres casos, el sol permanecerá sin movimiento.



Ilustración 9. Cambio interno de 3 velocidades en las bicicletas.

En la marcha baja, el piñón (externo, conectado mediante cadena al eje de los pedales) hace girar la corona, mientras que el chasis hace girar el buje, dando una marcha reductora.

En la marcha intermedia, el piñón hace girar al buje de forma directa. Y, finalmente, en la marcha alta, el piñón hace girar el brazo y será la corona la que haga girar el buje (justo a la inversa de la marcha reductora).

Teniendo presente este caso, aquellos que conecten varios trenes epicicloidales en serie operarán de la misma forma o muy similar. El cambio se realizará mediante cable, o mediante palanca de cambio.

2. ESTUDIO DEL MODELO EXISTENTE EN EL LABORATORIO

En vista de la importancia de los trenes de engranajes planetarios en industria, son una parte de estudio dentro del plan de estudios del Grado en tecnologías industriales. De hecho, para entender mejor su funcionamiento, se realizan sesiones de laboratorio para estudiar modelos físicamente.

El modelo principal de estudio es el tren de engranajes de dos etapas, comprado en su momento a TecQuipment. Este es un modelo que permite fijar diferentes elementos para comprobar por uno mismo la reducción o multiplicación en función de la entrada y la salida. Este se puede apreciar en la ilustración, con sus principales elementos indicados.

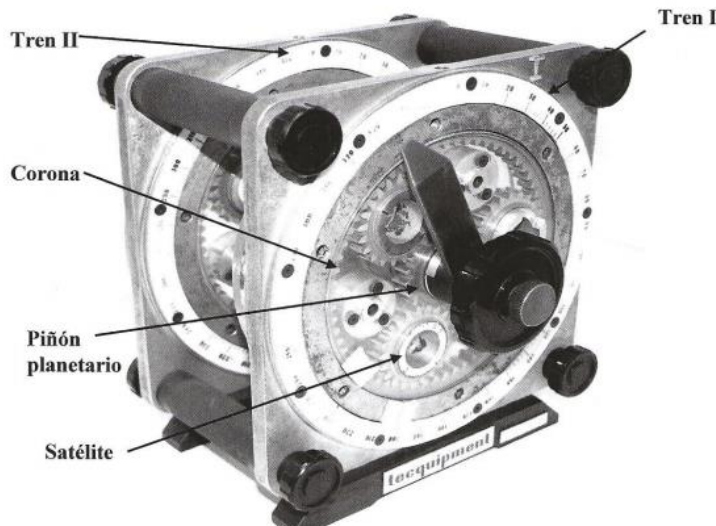


Ilustración 10. Modelo actual del laboratorio, de TecQuipment

Sin embargo, en el laboratorio solo se dispone de un modelo de este tipo para los alumnos. Además, TecQuipment ya no fabrica este modelo. Por este motivo, se procederá a hacer un estudio de este elemento, para poder fabricar un nuevo modelo que permita que más alumnos puedan tenerlo de cerca para realizar la práctica y, además, disponer de un archivo en el que se pueda reemplazar rápido cualquier elemento que se pueda extraviar o sufrir algún otro tipo de percance.

Para realizar un estudio preciso, se estudiará por un lado su morfología -el global de todos sus componentes-, y, por otro lado, el desarrollo de la práctica que realizan los alumnos -el proceso experimental en las sesiones de laboratorio-.

2. ESTUDIO DEL MODELO EXISTENTE EN EL LABORATORIO

2.1 Estudio de los componentes del modelo.

La parte principal de estudio de este modelo se puede fijar claramente en los engranajes, encargados de hacer la transmisión. El resto de elementos acaban siendo secundarios, en el sentido que, o bien forman parte de la bancada que soporta estos elementos, o bien son ejes o elementos para hacer la fijación de elementos en las diferentes relaciones de velocidad estudiadas.

Como detalle también a destacar -a rasgos generales del modelo- es que, debido al origen de procedencia británica de la compañía que comercializaba el producto, TecQuiment, las medidas de las piezas normalizadas, se rigen según normativa de medida imperial y no normativas DIN u otro estándar. Esto es un detalle importante porque dificulta la búsqueda de posibles recambios, o bien los hace más caros debido a su menor oferta en el mercado.

2.1.1 Estudio de los engranajes de los trenes

Lo que se aprecia al comparar los datos de los engranajes de las dos etapas, aunque a simple vista sea imperceptible, es la diferencia en el número de dientes. El tren I tiene unos engranajes de 21 dientes el piñón, otros 21 los 3 satélites y 63 dientes la corona. Por el contrario, el tren II también tiene un piñón de 21 dientes, pero el resto de elementos son diferentes. Los satélites son de 20 dientes y la corona es de 63 dientes. Aunque instintivamente la diferencia de 1 diente puede ser considerada como una variación despreciable, no es así, más bien todo lo contrario. Gracias a esto, los alumnos pueden ver por sí mismos este hecho al realizar la práctica. Como último detalle respecto a los engranajes, referente al material, son de acero al carbono.

El brazo está constituido por dos discos de metacrilato, unidos entre sí por tres ejes del mismo ancho que los engranajes, con un agujero central para permitir la sujeción en los casos de estudio en que se desee fijar los brazos de los dos trenes.

2. ESTUDIO DEL MODELO EXISTENTE EN EL LABORATORIO

2.1.2 Estudio de la bancada de soporte a los engranajes

La bancada en sí está hecha amoldada totalmente a los engranajes. Así, cada tren está sujetado por una placa principal -siendo esta también de acero al carbono- con un agujero circular para acoplar en su interior todo el módulo de transmisión. En su zona externa, tiene una forma cuadrada con los cantos redondeados, para facilitar también su transporte sin sufrir ningún percance o molestia.

Un segundo elemento que se observa es que a cada lado de la placa principal hay un disco graduado de plástico de un color amarillo pastel con las marcas por cada grado. Así, teniendo en cuenta que la corona dispone de una marca, se puede comparar la rotación de los dos trenes para valorar la velocidad según la reducción que se esté efectuando.

Como último detalle, cada placa tiene una pata que permite el apoyo firme cuando se está utilizando el modelo, pero a la vez facilita el transporte también debido a su disposición y forma. Estas van atornilladas a la placa principal mediante unos tornillos

2.1.3 Estudio de los ejes para acoplar los dos trenes

El acoplamiento entre las dos placas se realiza mediante 4 ejes -uno en cada esquina- y dos tapones roscados por cada eje de enganche. Este eje de enganche es de acero al carbono, mientras que el tapón roscado es de plástico -la rosca, eso sí, es también de acero-. Los ejes de enganche tienen una zona moleteada, que también permite y facilita el transporte a través de su agarre.

2.2 Desarrollo de la práctica con el modelo existente.

Para el correcto desarrollo de la práctica y la síntesis de los conceptos que se trabajan en esta práctica, esta requiere de una parte de trabajo experimental en el laboratorio acompañada de una parte de trabajo final en casa de cálculos y análisis.

2. ESTUDIO DEL MODELO EXISTENTE EN EL LABORATORIO

2.2.1 Tarea de la práctica a realizar en el laboratorio

La parte de trabajo en el laboratorio consiste en dos partes. Por un lado, una parte previa de entender los diferentes elementos. Una vez hecho este ejercicio, se debe hacer un esquema lineal correspondiente del tren de engranajes.

La segunda parte del trabajo en el laboratorio es, claramente, la parte experimental propiamente de la práctica. Las relaciones a calcular son las siguientes, tal y como se ve en la Tabla 1:

Tabla 1: Relaciones de velocidad a realizar en las prácticas de laboratorio con el modelo actual.

Relaciones de velocidad	
TREN I	TREN II
$\omega_{chasis} / \omega_e$	$\omega_{chasis} / \omega_e$
$\omega_{corona} / \omega_e$	$\omega_{corona} / \omega_e$
$\omega_{satélite} / \omega_e$	$\omega_{satélite} / \omega_e$
$\omega_{piñón I} / \omega_e$	$\omega_{piñón II} / \omega_e$

La entrada vendrá fijada por el profesor para cada relación de velocidades. Como esta será siempre uno de los elementos del tren I o II, se eliminará alguna de las relaciones anteriores de velocidad.

2.2.2 Tarea de la práctica a realizar en casa

Con los datos y la información obtenida y explicada en el laboratorio, esta información debe ser procesada y analizada por el alumno para asimilar satisfactoriamente los conceptos. Así, se deberá realizar un pequeño informe de la práctica.

Este informe deberá contener 4 partes. Primeramente, como contextualización de la práctica, se deberá pasar a limpio el esquema del tren, absorbiendo posibles correcciones del profesor, o simplemente, rehaciéndolo con una presentación apropiada.

Después de la primera parte de contextualización, la segunda parte y la tercera contendrán el grueso y la información más importante, con los cálculos y el

2. ESTUDIO DEL MODELO EXISTENTE EN EL LABORATORIO

análisis posterior de los resultados obtenidos. Aquí también se espera que el alumno pueda comparar sus resultados con los que se habían obtenido experimentalmente en el laboratorio y, en caso de posibles divergencias, saber entender el porqué.

Finalmente, la parte cuarta y última es la que debe ser el resumen del informe con las conclusiones extraídas, así como el comentario final respecto de posibles observaciones e incidencias observadas durante la sesión en el laboratorio.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

Teniendo presentes los detalles del modelo existente, tanto sus conceptos más favorables como los que menos deseables, se procederá a crear un modelo propio. El objetivo es que sea fabricable en su mayor parte dentro de la propia UPC, con las máquinas y herramientas disponibles en sus talleres y laboratorios.

Al igual que se ha analizado el modelo actual del laboratorio en diferentes módulos, se desgranarán los detalles del diseño según diferentes módulos. Dicho esto, se procede a enumerar cada uno de los módulos con sus particularidades de diseño.

3.1 Módulo de transmisión

Este es el módulo principal. De este dependerá el diseño del resto de elementos. Por ello, para no tener una máquina final excesivamente grande, se diseñarán todos los engranajes con un módulo de 2,25. Pero para dimensionar correctamente los engranajes también es necesario saber el número de dientes.

Así, el segundo paso necesario para diseñar los engranajes es el número de dientes. En este modelo, se opta por tener los dos trenes, -el tren I y el tren II- como dos trenes idénticos. Así, se decide que el piñón sea de 21 dientes, los satélites de 21 dientes y, por último, la corona de 63 dientes. Se adjunta una tabla con los valores característicos de cada elemento:

Tabla 2: Características de los engranajes diseñados.

	Piñón	Satélite	Corona
Módulo	2,25	2,25	2,25
Nº de dientes	21 dientes	21 dientes	63 dientes
Ángulo de presión	20°	20°	20°
Diámetro interior	41,998 mm	41,998 mm	136,499 mm
Diámetro primitivo	47,25 mm	47,25 mm	141,75 mm
Diámetro exterior	51,75 mm	51,75 mm	146,25 mm
Paso circular	7,069 mm	7,069 mm	7,069 mm
Altura del diente	4,876 mm	4,876 mm	4,876 mm

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

Comentadas las características generales de los engranajes, se detallarán otros datos a tener en cuenta para el diseño y montaje de estos. Una vez comentado esto, se procederá con la descripción del brazo y sus sujeciones.

3.1.1 Características del piñón

En la ilustración 11, se puede ver una vista del piñón. Este tendrá un ancho de 14 mm de cara, pero no será macizo. Tendrá un agujero interior para poder fijar cuando convenga mediante un eje conector con el piñón del otro tren.



Ilustración 11. Vista del piñón

Como segundo detalle importante de esta pieza, está el sistema ideado para sujetar el piñón con el metacrilato. En cada cara tiene un saliente en forma de cilindro hueco con una zona central sin extruir, que mantiene separados los dos salientes. Este es el sistema propuesto para la adición de un eje auxiliar que permita fijar un eje hueco auxiliar para unir los soles de los dos trenes.

3.1.1 Características de los satélites

El segundo elemento dentado a comentar es el satélite. El diseño de los satélites es prácticamente idéntico al del piñón central; ciertamente, los dos tienen el mismo módulo y el mismo número de dientes. Así, el ancho de cara de los dientes será el mismo, además de la cota del agujero interior, totalmente pasante

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

para permitir la conexión entre los dos trenes según la relación de velocidades que se desee.



Ilustración 12. Vista del satélite

Sin embargo, el factor diferencial entre los dos componentes está en ese saliente tan apreciable en la ilustración 12 y que se puede comparar con el del piñón en la 11. Tiene el mismo diámetro que en el piñón, pero, en el caso de los satélites, no tiene ninguna hendidura central. Además, su extrusión es menor debido a que no se debe acoplar ningún eje, sino únicamente sujetar el engranaje en el metacrilato.

3.1.3 Características de la corona

El tercer elemento dentado del sistema es la corona exterior, de 63 dientes. En este elemento, mostrado en la ilustración 13, se pueden distinguir varios detalles interesantes de mención como, por ejemplo, el saliente lateral, los agujeros de las caras laterales, o el agujero superior.

Para empezar, el diámetro interior deja un pequeño espacio entre los dientes y la cara lateral. En esta zona se aloja el metacrilato que hará de brazo. En un segundo nivel, el saliente cuyo espesor es el ancho del metacrilato y con un diámetro máximo que coincide con el diámetro exterior del disco graduado que marca el giro angular.

Una vez pasado el saliente comentado, se vuelve a reducir el ancho para permitir que el disco graduado, que se atornilla a la bancada, limite el desplazamiento horizontal de la corona -y, por ende, de todo el módulo de transmisión- aunque permitiendo un pequeño juego. Como último detalle, el diámetro exterior está pensado para encajar con juego ligero en la bancada del tren.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

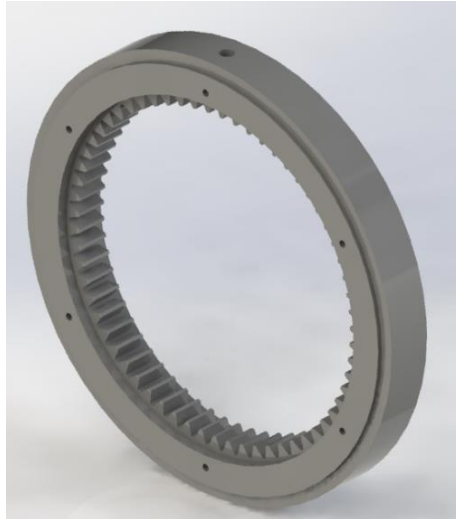


Ilustración 13. Vista de la corona

También son importantes en esta cara lateral los 6 agujeros que hay. Estos tienen como fin el acoplamiento de ejes en alguna de las posibles configuraciones para unir la corona con el elemento que se desee.

El último detalle a comentar, que se aprecia claramente en la zona superior, es un agujero (el cual es ciego). Este se ha colocado con la intención de añadir un eje por la parte superior de la bancada para bloquear el giro de la corona cuando así se desee.

Para finalizar con este apartado, está el material que compondrá los tres elementos. Puesto que la resistencia mecánica a soportar no es excesivamente elevada y, además, interesa un peso ligero para facilitar el transporte con comodidad, se opta por fabricar estos elementos mediante fabricación aditiva, con ABS. Este es un plástico con unas buenas propiedades mecánicas, ligero y con una fácil reciclabilidad al ser un termoplástico².

3.1.4 Chasis

Otro elemento dentro de la parte de transmisión de la máquina, pero al margen de los elementos dentados, es el brazo o chasis. En el diseño creado, el chasis se realiza a través de dos elementos: un metacrilato a cada lado de los

² Franco Balderas, S. *Reciclado de ABS (acrilonitrilo Butadieno Estireno)* [en línea]. Trabajo de Fin de Máster, Campus Monterrey, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. División de Ingeniería y Arquitectura, 2003.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

engranajes, y un eje entre los dos metacrilatos con la anchura de los engranajes para asegurar su fijación.

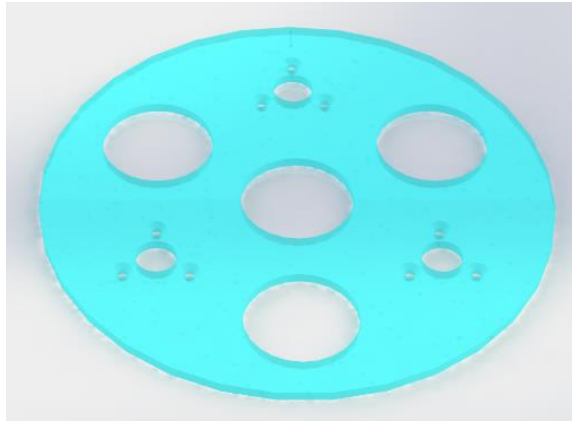


Ilustración 14. Vista del chasis.

Como se puede apreciar en la ilustración 14, este componente tiene un agujero central de que coincide con el diámetro exterior del saliente de los piñones, de tal manera que este quedará encajado y fijado. Además, de la misma medida que este agujero central, se encuentran 3 agujeros idénticos alrededor, separados entre sí por 120° . Estos serán los que servirán para encajar a los tres satélites.

Además de estos agujeros, se encuentran otros 3, también a 120° entre sí, pero desfasados 60° con los agujeros de los satélites. Estos son especiales para los 3 ejes que unirán los dos metacrilatos y mantendrán fijos los engranajes. Por ello, alrededor de estos agujeros también hay 3 agujeros para poder unir el metacrilato, sin rosca, con los ejes, cuyo agujero sí es roscado.

Por último, se encuentra una entalla en una de las caras (la que debe quedar por fuera de los engranajes) para poder visualizar con facilidad el ángulo desplazado.

Teniendo en cuenta que el material es metacrilato, como ya se ha dicho, estas piezas se modelarían en una máquina de corte láser. De esta forma la entalla se haría no como corte, sino como un grabado, sin penetrar por completo.

3.1.5 Eje satélite

El último elemento que conforma el módulo de transmisión son los ejes satélites que unen los dos metacrilatos mediante tornillos y mantienen fijos los engranajes. Sus elementos principales, los cuales se pueden ver en la ilustración

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

15, son el agujero central pasante, el saliente que sobresale y los agujeros ciegos.

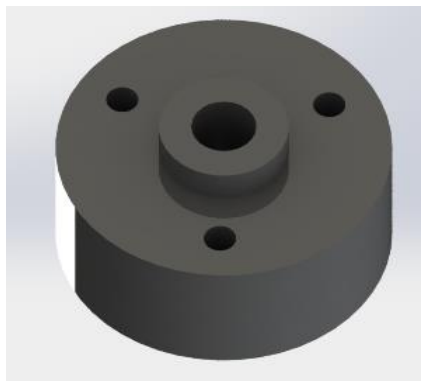


Ilustración 15. Vista del eje satélite

El agujero central permite fijar los dos trenes haciendo solidario el giro de los brazos. El saliente encaja el eje dentro del metacrilato, sobresaliendo exactamente el ancho de este, para sujetar el eje igual que el piñón y los satélites.

Por último, se encuentran los agujeros roscados para los tornillos. Son agujeros ciegos, de métrica M3; de esta manera, se facilita la posible sustitución al utilizar una métrica DIN normalizada.

Referente al material de estos ejes, teniendo en cuenta que no deben soportar esfuerzos y únicamente deben ir atornillados por tres puntos, se opta por un acero al carbono de baja aleación, como es el F-114.

3.2 Bancada y soporte.

3.2.1 Placa principal

La placa principal es el elemento de sujeción principal de toda la transmisión. Se describirá a través de los principales elementos que se distinguen en la ilustración 16, como son, el agujero central, los dos salientes laterales, los cuatro agujeros pasantes en las esquinas y, por último, el agujero ciego en la cara superior.

El diámetro del agujero central coincide con el diámetro exterior de la corona dentada. Su ajuste será con un juego ligero para que la corona pueda girar sin dificultades.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

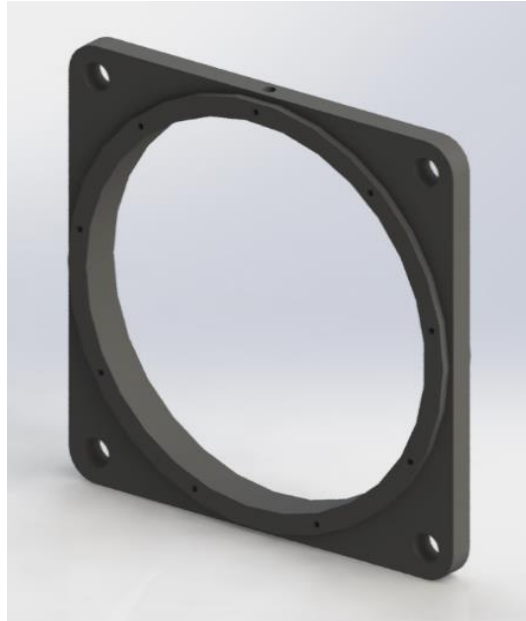


Ilustración 16. Vista de la Placa principal

Referente al saliente -el cual está simétrico en las dos caras-, tiene el diámetro exterior igual al disco graduado, puesto que este descansará sobre esta cara y se atornillará a los agujeros roscados que aquí se han dispuesto.

En su zona exterior, tiene una forma cuadrada con una longitud de lado de 210 mm, con los cantos redondeados, para no causar molestias al transportarlo. Esto supone unas medidas no excesivamente grandes ni tan pequeñas que dificulten el estudio experimental que realizarán los alumnos.

Además, en las esquinas se encuentran 4 agujeros de para poder pasar los ejes que unen los dos trenes. Como último detalle, en su cara inferior tiene dos agujeros -siendo la pieza, totalmente simétrica- de métrica M5 según DIN 912 y 10 mm de profundidad para unir esta pieza con las patas.

Por último, el material de esta pieza es de fundición GG-25. No es necesario un material caro como el aluminio para el uso docente que se le va a dar y esta fundición es un buen material que además permitirá no subir demasiado los costes teniendo en cuenta que es uno de los elementos más voluminosos.

3.2.2 Patas

Las patas son el soporte de la placa principal para facilitar el apoyo sobre el lugar de trabajo. En ellas, además de las caras planas que irán en contacto con la

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

superficie de apoyo, en la ilustración 17 se puede apreciar una zona lateral achaflanada, puesto que el ancho de la pata es mayor al de la placa principal y con esto se elimina un canto vivo para no causar percances.

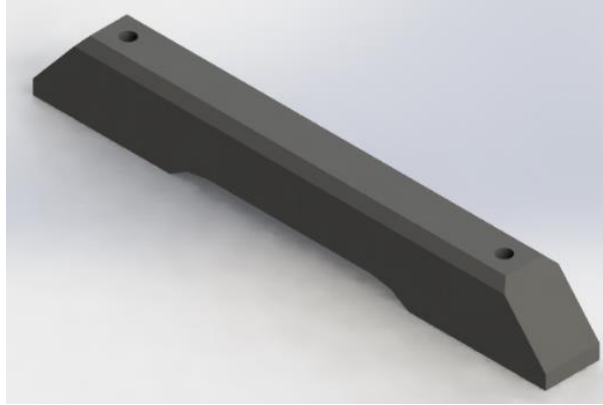


Ilustración 17. Pata de la placa principal

Además, en su cara inferior tiene dos agujeros pasantes por donde se pasan los tornillos que unen esta pieza con la placa principal. Como la rosca ya la llevan los agujeros de la placa, en esta pieza son únicamente agujeros pasantes sin roscar, aunque con el agujero propio para que la cabeza no entorpezca el apoyo.

Referente al material, se dispone de otra pieza de fundición GG-25, que debe soportar el peso de toda la máquina. Con este material se asegura esta resistencia a la vez que no se encarece el producto.

3.2.3 Disco graduado

El disco graduado es un elemento con dos funciones. Su función más clara es la de indicar el número de grados de desplazamiento. Además de tener los grados, tiene una marca en su zona superior que así lo hará saber.

En segundo lugar, y en una función muy importante, está la eliminación del grado de libertad que tendría la corona si se pudiera desplazar horizontalmente. Al colocar este disco, se elimina ese movimiento y, por lo tanto, queda restringido únicamente al giro.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

Para ello, se atornilla esta pieza con la placa principal, en los agujeros que se aprecian en la ilustración 18. En este caso, son simples agujeros pasantes, puesto que la rosca ya la lleva la placa principal.

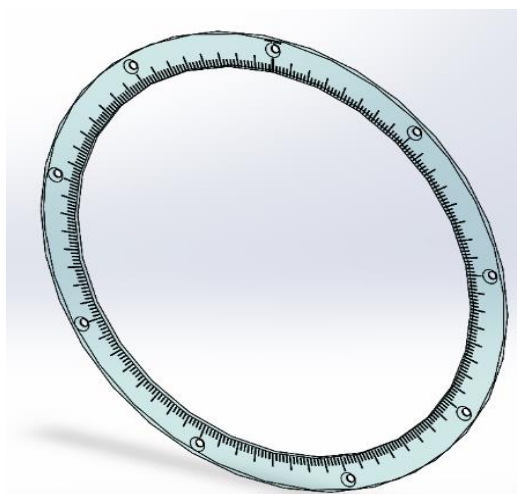


Ilustración 18. Vista del disco graduado

Como material y método de fabricación, se opta por fabricar esta pieza de metacrilato. Al ser de este material, se le daría forma en una máquina de corte láser; de manera que los grados y la marca para indicar los grados son procesos de grabado (sin corte total), mientras que los agujeros para los tornillos y la forma exterior sí que son de corte total.

3.2.4 Eje de enganche

Este eje es el que se ocupa de unir la placa principal del tren I con la del tren II. Se encaja con los agujeros que estas disponen en cada una de sus esquinas y se fijan con el tapón roscado en los agujeros roscados de estos ejes en sus dos caras planas. En la ilustración 19 se muestra claramente su geometría para entender mejor cada elemento y detalle comentado.

A su vez, estos ejes están moleteados (aunque en la ilustración 18 no se aprecie), para facilitar otro modo de agarre para el transporte del artefacto.

En cuanto a material, estos ejes se fabricarán de acero al carbono F-114, un acero bajo al carbono, suficiente para realizar esta labor de unión y, a la vez, barata para no encarecer demasiado el coste final.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

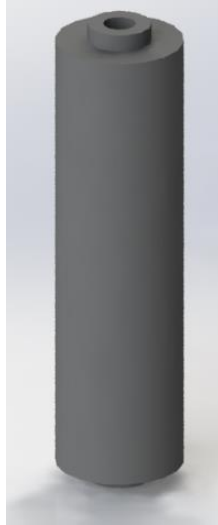


Ilustración 19. Vista del eje de enganche

3.2.5 Tapón roscado

El tapón roscado es la pieza indispensable para mantener bien fijadas las dos placas. A través del eje conector, se roscan dos tapones de este tipo -uno por cada lado- para que las placas principales se queden fijas.

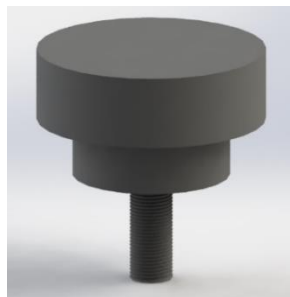


Ilustración 20. Vista del Tapón roscado

Como se ve en la ilustración 20, este tapón se compone de 3 diámetros diferentes. El más pequeño, es el diámetro roscado, que encaja con el eje de enganche para unir los dos trenes. El segundo diámetro, es aquel que hará de límite con la placa principal. Por último, el diámetro mayor es aquel que servirá para roscar y fijar la pieza, el cual estará moleteado (aunque sea un detalle no perceptible en la ilustración).

Referente a este material, se utilizará un acero al carbono de baja aleación, un F-114, de bajo coste, pero con suficiente resistencia mecánica para soportar los esfuerzos de la máquina creada.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

3.3 Ejes auxiliares para las distintas relaciones.

3.3.1 Eje de enganche de soles

Este eje es el encargado, en una de las posibles configuraciones del sistema, de mantener unidos los soles del tren I con el del tren II, para que giren solidarios.

Como se puede apreciar en la ilustración 21, en una de las caras planas tiene dos salientes, mientras que, en la otra cara plana, es un corte de la misma forma y las mismas medidas. Este sistema encaja con los engranajes, sin necesidad de tener que añadir chavetas ni otros elementos de fijación extra. Con una sola pieza como es este eje, se logra la unión de los dos engranajes centrales.



Ilustración 21. Vista del eje de enganche de soles

En cuanto al material, se opta nuevamente por el acero al carbono F-114, un acero bajo en aleación, económico y suficiente para transmitir el esfuerzo que se haga entre los dos piñones.

3.3.2 Eje con mango

Este es el eje encargado de unir engranajes de los dos trenes, bien sean los soles o dos de los satélites. Está formado por un conjunto de 4 piezas (las cuales se pueden vislumbrar en la ilustración 22): un eje largo, el gancho, el tapón de plástico del mango y el tapón final, un tapón moleteado.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

En cuanto al material de las piezas, todas están hechas de acero al carbono F-114, a excepción del tapón de plástico, el cual está hecho mediante fabricación aditiva y es de ABS.



Ilustración 22. Vista del Eje con mango ensamblado, compuesto por 4 piezas

3.3.3 Eje fijador de la corona

Este eje está diseñado con la finalidad de bloquear el giro de la corona. Se introduce a través de la ranura superior de la placa principal y penetra hasta el final del agujero ciego de la corona dentada. Además, cuenta con una cara moleteada en su zona de mayor diámetro para facilitar el contacto al cogerlo.

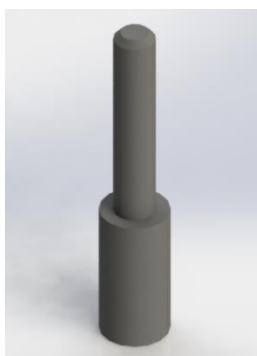


Ilustración 23. Vista del eje fijador de la corona

Este eje se fabrica en un torno y está compuesto de acero al carbono F-114, por tal de resistir bien los posibles esfuerzos cortantes al intentar girar la corona. En la ilustración 23 se pueden ver sus principales características geométricas, recién enumeradas.

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

3.3.4 Eje de fijación de satélites del brazo

Este eje se encarga de fijar los satélites del brazo de un tren con los del otro tren. Así, se logra la misma rotación de los brazos en los dos trenes. En su cilindro más corto, dispone de un chaflán para facilitar su entrada en el agujero central de los satélites. Además, para mejorar su agarre, el diámetro mayor está moleteado (todos los detalles constructivos explicados, se muestran en la ilustración 24, a excepción del moleteado, no visible en la figura gráfica).

En cuanto al material, se compone de acero al carbono F-114, para soportar los esfuerzos cortantes tangenciales que se producirán al girar los brazos.



Ilustración 24. Eje de fijación de satélites del brazo

3.3.5 Ejes roscados

Por último, como ejes auxiliares para las distintas configuraciones, se dispone de dos piezas roscadas, un eje y un tapón para este eje, visibles en la ilustración 25. Ambos están compuestos de acero F-114 y tienen una parte moleteada para disminuir la posibilidad de deslizamiento por contacto al cogerlos.

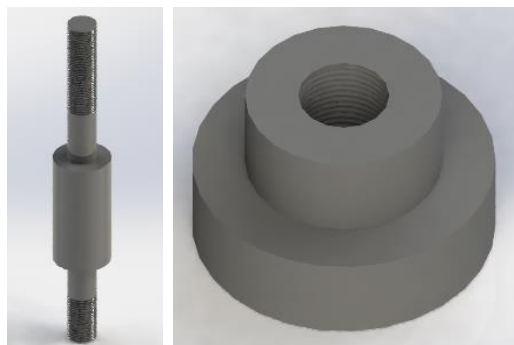


Ilustración 25. Vistas del eje roscado (izquierda) y el tapón (derecha)

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

3.4 Conjuntos de brazos auxiliares.

Los tres conjuntos auxiliares del módulo D (según la nomenclatura del árbol de componentes) son un conjunto de elementos concebidos para el montaje de diferentes configuraciones del modelo.

Como rasgos generales, tanto el conjunto 1 como el conjunto 2 son dos ensamblajes compuestos por un metacrilato y un eje central. En cambio, el metacrilato auxiliar -entendido como el tercer conjunto- no contiene eje central.

3.4.1 Conjunto auxiliar 1

Este primer conjunto se compone, como se ha comentado, de un metacrilato y un eje central, los cuales se pueden ver atornillados en la ilustración 26. El metacrilato contiene diversos agujeros sobre los que poder meter los ejes apropiados del módulo C (con denominación de “Ejes auxiliares”, en el árbol de componentes) con tal de fijar los elementos deseados entre un tren y el otro.

Referente a los materiales, el eje central está hecho de acero F-114, un acero al carbono, además del ya mencionado metacrilato.

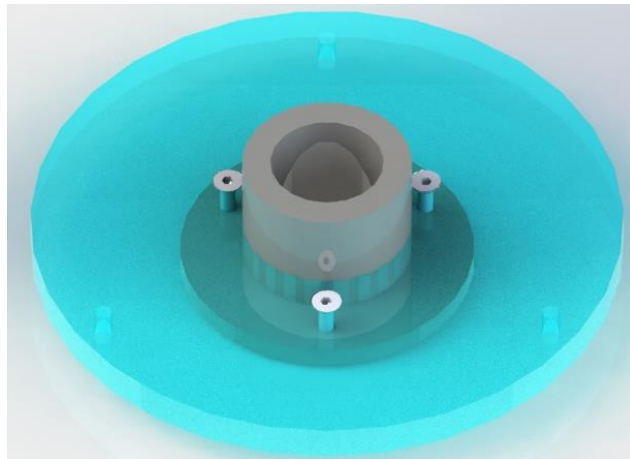


Ilustración 26. Conjunto auxiliar 1

3.4.2 Conjunto auxiliar 2

Este es otro conjunto compuesto por un metacrilato y un eje central. El metacrilato dispone de varios agujeros en su zona central para así, poder unir elementos de los trenes como, por ejemplo, el piñón de un tren con la corona del otro tren. Es otro conjunto para posibles variaciones del modelo primario, aunque

3. DISEÑO DE UN NUEVO MODELO DE PRÁCTICAS CON TRENES EPICICLOIDALES

la diferencia principal con respecto al conjunto auxiliar 1 está en las medidas del metacrilato.

Este metacrilato, de mayor tamaño, permite unir con la corona, cosa que el anterior no (apreciable en la ilustración 27, al disponer de una hilera intermedia de agujeros adicional). El motivo por el que se diseñan dos conjuntos por separado, en lugar de uno, es la mejor maniobrabilidad del conjunto 1, de tamaño más compacto, para cuando no hace falta unir las coronas.

En cuanto a material, además del propio metacrilato ya comentado, está el eje, de acero al carbono F-114.

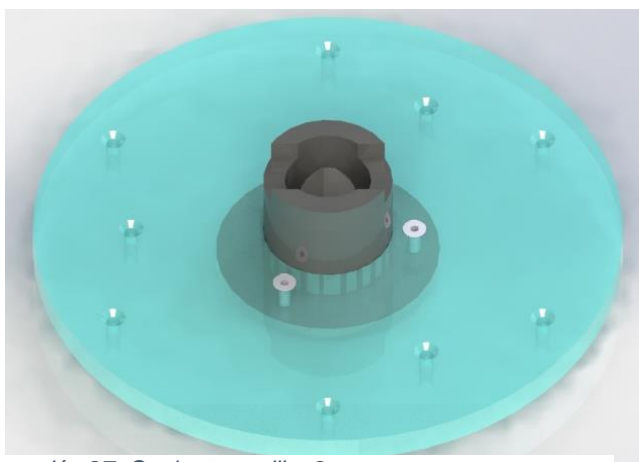


Ilustración 27. Conjunto auxiliar 2

3.4.3 Metacrilato auxiliar

Este último elemento auxiliar es un metacrilato, muy similar en cuanto a cotas respecto al de conjunto 2, como se ve en la ilustración 28. La principal -y única- diferencia entre este y el metacrilato anterior radica en que este no está diseñado para acoplar un eje central, de tal forma que no tiene los agujeros para atornillar. El resto de agujeros y medidas, en cambio, son los mismos.

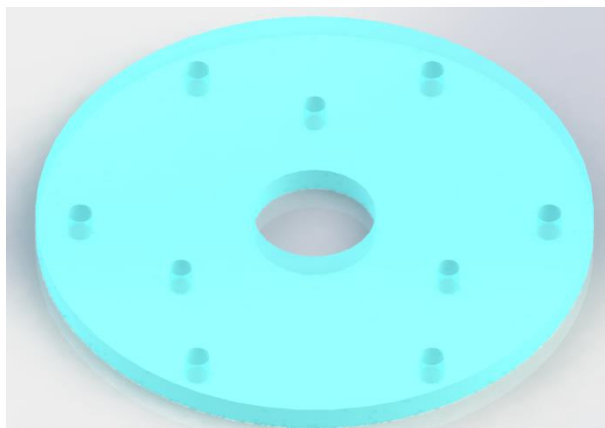


Ilustración 28. Metacrilato auxiliar

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

Con el modelo diseñado, se propone un guion de prácticas como tarea a realizar por el alumnado. Esta propuesta incluirá un pequeño anexo teórico introductorio y planteará la tarea al alumno.

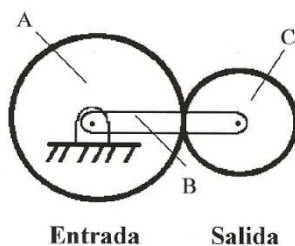
A diferencia de la práctica a realizar con el modelo actual, en que primero se realiza la sesión en el laboratorio y después se realiza el análisis en casa, esta idea de trabajo invierte el orden: esto es, el alumno hará un pequeño trabajo previo, para posteriormente verificarlo experimentalmente en el laboratorio.

El objetivo es seguir el modelo de una “Flipped-Classroom”, algo muy interesante teniendo en cuenta que se aplicaría en unas sesiones totalmente experimentales por los estudiantes y con la guía del profesor únicamente como aclaración de conceptos y dudas. Dicho esto, se procede al desglose del guion de prácticas.

4.1 Introducción teórica a la práctica

4.1.1 Relación de transmisión y relación de velocidad. Fórmula de Willis

La forma más simple de un tren epicicloidal es la que se muestra en la ilustración 29.



A : Planetario B : Brazo ó chasis C : Satélite

Ilustración 29: Esquema del tren epicicloidal más simple

Si el brazo o chasis está fijado, el sistema se reduce a un tren ordinario simple. La fórmula de Willis establece una relación funcional entre las tres velocidades angulares. Esta es:

$$\frac{\omega_{salida} - \omega_{chasis}}{\omega_{entrada} - \omega_{chasis}} = \eta \rightarrow -\frac{Z_A}{Z_C} = \frac{\omega_C - \omega_B}{\omega_A - \omega_B}$$

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

Donde η es la relación de transmisión aparente entre el planeta y el satélite vista desde el chasis, ergo supuesto el chasis fijo. Los tres ejes de giro de la rueda de entrada, la rueda de salida y el brazo, deben ser paralelos para poder aplicar esta fórmula.

Ahora bien, en la siguiente figura (ver ilustración 30) se observa que:

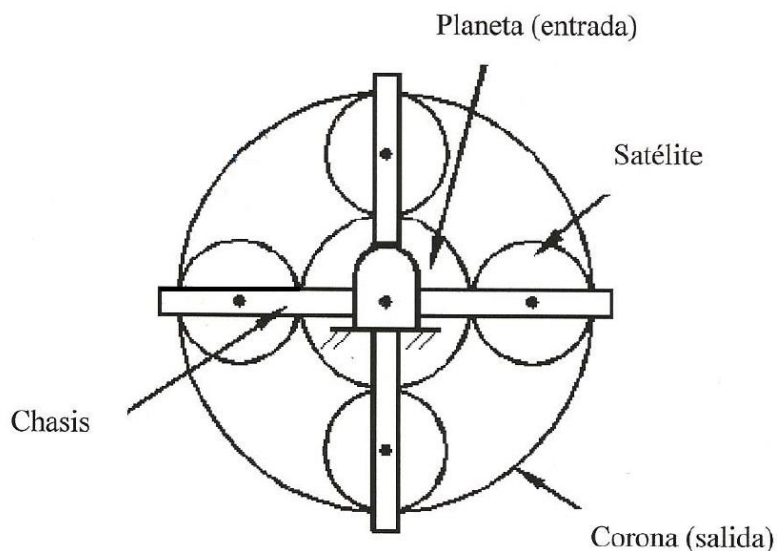


Ilustración 30: Tren epicycloidal con 4 satélites

En este caso, la entrada o la salida pueden serlo tanto el planetario como la corona; el chasis no podrá ser nunca entrada o salida (en la fórmula de Willis), aunque sí que pueda serlo en la aplicación práctica.

En el caso anterior, para los siguientes números de dientes:

$$Z_{\text{planeta}} = 20 \text{ dientes}$$

$$Z_{\text{satélite}} = 15 \text{ dientes}$$

$$Z_{\text{corona}} = 50 \text{ dientes}$$

Se puede observar que las tres ruedas (planeta, corona y satélite) engranan entre sí y, por tanto, deben tener el mismo módulo. Ello se traduce en que:

$$R_{\text{corona}} = R_{\text{planeta}} + 2 \cdot R_{\text{satélite}}$$

Y como que todas deben tener el mismo módulo, resulta:

$$R_{\text{corona}} = R_{\text{planeta}} + 2 \cdot R_{\text{satélite}}$$

$$50 = 20 + 30$$

Es importante observar que la relación de velocidades μ_v es el cociente entre dos velocidades angulares. En cambio, la velocidad de una rueda respecto de

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

otra es la diferencia entre ambas velocidades angulares. Así pues $\mu_V = \frac{\omega_{chasis}}{\omega_{planeta}}$ es la relación de velocidades angulares entre el chasis y el planeta.

En cambio, la velocidad angular del planeta respecto del chasis es:

$$\omega_{planeta/chasis} = \omega_{planeta} - \omega_{chasis}$$

Esto último explica la necesidad de que los tres ejes (entrada, salida y chasis en la fórmula de Willis) sean paralelos para poder restar de forma algebraica las velocidades angulares (se recuerda también que las velocidades angulares son vectores).

Entonces, con la corona fija, ¿cuál es la relación de transmisión η ?

Para aplicar en este caso la fórmula de Willis se decide que la entrada sea el planeta y la salida la corona:

$$\eta = \frac{\omega_{salida} - \omega_{chasis}}{\omega_{entrada} - \omega_{chasis}} = -\frac{Z_{planeta}}{Z_{satélite}} \cdot \frac{Z_{satélite}}{Z_{corona}} \qquad \eta = \frac{0 - \omega_{chasis}}{\omega_{entrada} - \omega_{chasis}} = -\frac{2}{5}$$

Si la entrada hubiera sido la corona y la salida el planeta, entonces la relación de transmisión (η) sería $-5/2$ y la fórmula de Willis se podría expresar de esta forma que coincide con la expresión anterior de Willis donde se han intercambiado numerador con denominador:

$$\frac{\omega_{entrada} - \omega_{chasis}}{0 - \omega_{chasis}} = -\frac{5}{2}$$

¿Cuál sería la relación de velocidades entre el chasis y el planeta?

$$-\omega_{chasis} = -\frac{2}{5} \cdot \omega_{planeta} + \frac{2}{5} \omega_{chasis} \qquad -\frac{7}{5} \omega_{chasis} = -\frac{2}{5} \cdot \omega_{planeta}$$

$$\text{Luego } \mu_V = \frac{\omega_{chasis}}{\omega_{planeta}} = \frac{2}{7}$$

Por lo tanto, si se quiere contrastar experimentalmente esta relación de velocidades, se hará dando un giro al planeta y observando el giro del chasis. La relación será:

$$\mu_V = \frac{\vartheta_{chasis}}{\vartheta_{planeta}} = \pm \frac{\text{ángulo girado por el chasis}}{\text{ángulo girado por el planeta}}$$

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

4.1.2 Descripción del equipo.

El equipo consiste en dos etapas de engranajes epicicloidades simples, Tren I y tren II. Estos están unidos entre sí a través de pasadores de unión y placas que con su acoplamiento permiten obtener diferentes configuraciones de trenes epicicloidades dobles con un grado de libertad.

4.1.3 Objetivo de la práctica

El objetivo de la práctica es la determinación analítica de las diferentes relaciones de velocidad para posteriormente verificarlas experimentalmente con un modelo físico específico para ello.

4.1.4 Proceso experimental

Para poder transmitir un par aplicado en la entrada del tren, uno o varios elementos deberán ser fijados; en función de la configuración que se disponga se fijarán unos u otros.

Para los casos a estudiar se puede proceder de dos maneras. Una primera opción, en la que se gire el elemento de la entrada y observar cuánto han girado el resto de elementos, para anotar posteriormente los resultados obtenidos.

Una segunda opción sería cuando el giro en el elemento a la entrada es de exactamente una vuelta completa, con lo que únicamente se debe mirar el ángulo en el disco graduado atornillado a la placa principal para determinar el giro. Sea cual sea el *modus operandi* para la obtención de las distintas velocidades, las relaciones a observar serán las siguientes:

Tabla 3: Relaciones de velocidad a observar

Relaciones a calcular
$\omega_{chasis} / \omega_e$
$\omega_{corona} / \omega_e$
$\omega_{satélite} / \omega_e$
$\omega_{piñón} / \omega_e$

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

4.1.5 Datos del tren

Las ruedas del tren epicycloidal tienen los siguientes números de dientes:

Tabla 4: Datos de las ruedas del tren epicycloidal

Elemento	TREN I	TREN II
Piñón	21 dientes	21 dientes
Satélite	21 dientes	21 dientes
Corona	63 dientes	63 dientes

Teniendo en cuenta que los dos trenes tienen los mismos elementos, se fijará siempre el elemento de entrada en el otro tren. Es decir, si se considera la velocidad del chasis del tren I, se tomará el elemento de entrada en el tren II; y en el caso que se estudie la velocidad de un elemento del tren II, el elemento de entrada será del tren I.

4.2 Propuesta de trabajo de prácticas

4.2.1 Trabajo previo desde casa

El alumno deberá realizar una serie de tareas que deberá presentar al inicio de la sesión de prácticas una serie de tareas indispensables para poder hacer la sesión experimental en el laboratorio.

- Realizar el esquema lineal del tren de engranajes.
- Determinar analíticamente las relaciones de velocidades, según se ve en la tabla inferior, hasta completarla.

Tabla 5: Tabla de velocidades a rellenar por el alumno (cálculo analítico).

Relación a calcular	ELEMENTOS A UNIR				
	Piñón-piñón	Piñón-chasis	Piñón-Corona	Chasis-Chasis	Chasis-Corona
$\omega_{chasis} / \omega_e$					
$\omega_{corona} / \omega_e$					
$\omega_{satélite} / \omega_e$					
$\omega_{piñón} / \omega_e$					

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

4.2.2 Trabajo en el laboratorio

El alumno iniciará la sesión de laboratorio con las relaciones de velocidad calculadas analíticamente desde casa, así como los esquemas lineales dibujados de antemano.

El alumno tomará el tren epicicloidal y realizará los montajes y cambios de pasadores y placas necesarios para completar la table experimentalmente.

Tabla 6: Tabla de velocidades a rellenar por el alumno experimentalmente

Relación a calcular	ELEMENTOS A UNIR				
	Piñón-piñón	Piñón-chasis	Piñón-Corona	Chasis-Chasis	Chasis-Corona
$\omega_{chasis} / \omega_e$					
$\omega_{corona} / \omega_e$					
$\omega_{satélite} / \omega_e$					
$\omega_{piñón} / \omega_e$					

Como último ejercicio y, completada la tabla, se procederá a comparar los resultados obtenidos previamente en casa, de forma analítica, con los datos obtenidos durante la sesión de prácticas.

Los cálculos previos, junto con los datos experimentales obtenidos y el comentario de los resultados, se entregarán al finalizar la clase.

4.3 Justificación de la propuesta

Como se ha comentado, esta práctica se ha planteado a modo de “Flipped-Classroom”. Hacerlo de este modo supone que los alumnos, en lugar de recibir la explicación del profesor y simplemente escuchar, realicen un aprendizaje autodidacta al hacer el trabajo antes de la sesión de laboratorio. De esta manera, la labor del profesor se limita a aclarar dudas en clase con quienes tengan dificultades mientras el resto de los alumnos avanzan a su ritmo.

A su vez también, en vista de las posibilidades que hay de cara al próximo curso 2020/21 que las clases no sean presenciales al 100%, trabajar de esta manera

4. PROPUESTA DE GUIÓN DE PRÁCTICAS CON EL NUEVO MODELO

es un factor a añadir extra para dar material a los alumnos y que estos puedan aprender al máximo grado posible, en un hipotético estado de clases no-presenciales (no sería necesaria la clase experimental para que ellos puedan desarrollar los cálculos, a diferencia del sistema actual).

En segundo lugar, se ha optado por este formato en que se entrega al finalizar la clase por varios motivos. Por un lado, al ya exigir un trabajo previo a realizar, no sería conveniente otra entrega a posteriori que aumente en demasía la carga de trabajo.

Por otro lado, generalmente los informes de prácticas suelen incluir muchos datos por parte de los alumnos de poco procesado, que copian sin más -bien sea de internet, o de otros alumnos de cursos anteriores- o simplemente los modifican por encima, hecho que supone para el profesorado, corregir muchos trabajos sin apenas variaciones. Por ello, se opta por este formato para que el trabajo que se haga sea, aunque menor, más eficaz.

Como último aspecto, se ha decidido hacer los dos trenes (tren I y tren II) con el mismo número de dientes para simplificar la práctica. Es decir, al ya existir un modelo de prácticas específico, en el que precisamente se valoran las relaciones de velocidades cambiando engranajes con un número de dientes diferente cada uno, se decide simplificar esta práctica. El objetivo es simplificar las prácticas de tal forma que los estudiantes relacionen un concepto concreto con cada estación de la práctica. De esta manera, se facilita la asimilación de las ideas propuestas inicialmente como objetivo por parte de los docentes.

5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

A continuación, se presentarán los costes del proyecto actual. Para simplificarlo, en los Presupuestos de Ejecución Material (PEM), se desgranará según los diferentes módulos designados en el árbol de componentes del proyecto. Una vez desarrollados todos los módulos, se procederá a explicar el total mediante una table resumen. Por último, se presentarán los costes de ingeniería, que deben ser contabilizados de forma independiente según los requerimientos del proyecto presentados al inicio.

Como comentario general, se han incluido en el coste unitario los posibles costes de mecanizado y operaciones de fabricación. Si bien no vendrán diseñados y acabados, sino que esto se hará en la propia universidad, permite ver unos presupuestos finales precisos y realistas.

5.1 Presupuestos de Ejecución Material (PEM)

5.1.1 Módulo de Bancada (Módulo A)

Tabla 7: Tabla de presupuesto del Módulo A

Código	Nombre elemento	Material	Unidades de obra		€/u.o	Coste		
			nº u.o./pieza	Nº planchas		unitario	nº Piezas	Coste total
A100	Base principal						2	143,62 €
A101	Patas	GG-25	kg	0,50	14	7,00 €	1	7,00 €
A102	Placa principal	GG-25	kg	1,76	14	24,61 €	1	24,61 €
A103	Disco graduado	Metacrilato	Nº planchas	1	19	19,00 €	2	38,00 €
-	Tornillos Avellanados DIN 7991 M3X8		-	-	-	0,10 €	18	1,80 €
-	Tornillos Avellanados DIN 7991 M5X35	-	-	-	-	0,20 €	2	0,40 €
A200	Tapón roscado	F-114	kg	0,09	10	0,90 €	8	7,20 €
A300	Eje enganche	F-114	kg	0,39	10	3,87 €	4	15,48 €
COSTE TOTAL								166,30 €

En este módulo, se encuentra un primer conjunto, que representa en volumen una parte importante de la máquina diseñada. Este conjunto se compone principalmente de dos materiales, como el acero al carbono y la fundición que, si bien pueden tener un peso mayor debido a su densidad, son materiales

5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

relativamente asequibles en cuanto a precio. Por causa de esta característica, se ha tomado como unidad de obra la masa (en kilogramos) de cada componente como unidad de referencia.

Por otro lado, también aparece un elemento de metacrilato. Este elemento representa de poco volumen, debido a que, pese a su gran diámetro exterior, viene siendo un anillo en el sentido de tener un diámetro interno también bastante grande. En este caso, la unidad másica como referencia habría supuesto un grave error, puesto que su poco peso no va en función de su coste. Más bien, se ha optado por tomar como unidad de obra el número de planchas necesarias para hacer cada disco graduado -y, por ende, de todos los elementos de metacrilato del proyecto-.

Como último detalle, en este primer módulo únicamente hay dos elementos de compra, como son los dos modelos de tornillos diferentes (M5x35 para la base principal y M3x8 para el disco graduado); estos representan un coste muy minoritario en el global del módulo.

5.1.2 Módulo de Transmisión (Módulo B)

Tabla 8: Tabla de presupuesto del Módulo B

Código	Nombre elemento	Material	Unidades de obra	nº u.o./pieza	€/u.o	Coste unitario	nº Piezas	Coste total
B100	Módulo de entrada						2	608,96 €
B101	Eje satélite	F-114	kg	0,083	10,00 €	0,83 €	3	2,48 €
B102	Metacrilato chasis	Metacrilato	kg nº planchas	1	19,00 €	19,00 €	2	38,00 €
B103	Corona 63 dientes	ABS	h	6	12,00 €	72,00 €	1	72,00 €
B104	Engranaje central 21 dientes	ABS	h	4	12,00 €	48,00 €	1	48,00 €
B105	Engranaje periférico 21 dientes	ABS	h	4	12,00 €	48,00 €	3	144,00 €
-	Tornillos Avellanados DIN 7991 M3X8	-	-	0		0,10 €	18	1,80 €
							COSTE TOTAL	608,96 €

En este segundo módulo se encuentra el grueso principal en cuanto a costes se refiere de todo el proyecto. Este módulo se compone principalmente de los engranajes y la corona cuya fabricación es mediante impresión 3D. Esto también

5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

supone el uso de una nueva unidad de obra, que se adapte mejor a la representación de los costes de las piezas fabricadas por este método.

Una vez más aparecen unos nuevos tornillos como elementos de compra, cuyo precio nuevamente es ínfimo en comparación con el valor total que se alcanza en este módulo.

Los dos elementos restantes son de acero al carbono y de metacrilato. Nuevamente se utilizan las unidades de obra ya comentadas, como son el kg de masa para el acero y el número de planchas necesarias para construir cada componente de este material.

5.1.3 Módulo de Ejes Auxiliares (Módulo C)

Tabla 9: Tabla de presupuestos del Módulo C

Código	Nombre elemento	Material	Unidades de obra	nº u.o./pieza	€/u.o	Coste unitario	nº Piezas	Coste total
C101	Eje enganche sol	F-114	kg	0,216	10,00 €	2,16 €	3	6,47 €
C200	Eje con mango	F-114	kg	0,500	10,00 €		1	34,77 €
C201	Eje unión soles	F-114	kg	0,361	10,00 €	3,61 €	1	3,61 €
C202	Gancho unión engranaje con eje	F-114	kg	0,067	10,00 €	0,67 €	1	0,67 €
C203	Tapón del mango de plástico	ABS	h	2,500	12,00 €	30,00 €	1	30,00 €
C204	Tapón moleteado del mango	F-114	kg	0,048	10,00 €	0,48 €	1	0,48 €
C301	Enganche superior de la corona	F-114	kg	0,019	10,00 €	0,19 €	1	0,19 €
C401	Eje roscado a dos bandas	F-114	Kg	0,033	10,00€	0,33 €	6	1,96 €
C501	Eje roscado por un lado	F-114	Kg	0,063	10,00 €	0,63 €	4	2,50 €
C601	Eje hueco roscado interiormente	F-114	kg	0,018	10,00€	0,18 €	12	2,21 €
						COSTE TOTAL		49,00 €

En este módulo se encuentran todas las piezas indispensables para montar las diferentes configuraciones del modelo, pero no necesarias para mantener la estructura inicial. Estos son los diferentes ejes del conjunto.

Hay un total de 3 ejes que son de una sola pieza, los cuales están compuestos en su totalidad por acero al carbono F-114. Estos tienen un coste relativamente bajo en cuanto a material y su mecanizado posterior se realiza en las máquinas

5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

del laboratorio. En definitiva, el modelo ideal de pieza para reducir los costes de la máquina.

También hay otro eje formado por el ensamblaje de 4 piezas. De estas 4, 3 son fabricados del mismo acero al carbono, mientras que la restante está hecha de ABS. Por el uso de este material, más cómodo y ligero para la función que va a cumplir, así como por ser un conjunto de varios componentes, este eje -con código C200-, se convierte en el eje que abarca mayor porcentaje de costes en este módulo.

Como último detalle de este bloque, en este módulo no hay ningún componente extra de compra, como serían los tornillos, a diferencia de los otros módulos.

5.1.3 Módulo de Conjuntos auxiliares (Módulo D)

Tabla 10: Tabla de presupuestos del módulo D

Código	Nombre elemento	Material	Unidades de obra	nº u.o./pieza	€/u.o	Coste unitario	nº Piezas	Coste total
D100	Conjunto auxiliar 1						1	21,58 €
D101	Metacrilato auxiliar 1	Metacrilato	nº planchas	1	19,00 €	19,00 €	1	19,00 €
D102	Eje central	F-114	kg	0,168	10,00 €	1,68 €	1	1,68 €
-	Tornillos Avellanados DIN 7991 M3X12	-				0,10 €	9	0,90 €
D200	Conjunto auxiliar 2						1	21,58 €
D201	Metacrilato auxiliar 2	Metacrilato	nº planchas	1	19,00 €	19,00 €	1	19,00 €
D102	Eje central	F-114	kg	0,168	10,00 €	1,68 €	1	1,68 €
-	Tornillos Avellanados DIN 7991 M3X12	-				0,10 €	9	0,90 €
D301	Metacrilato auxiliar 3	Metacrilato	nº planchas	1	19,00 €	19,00 €	1	19,00 €
						COSTE TOTAL		62,16 €

En este último bloque, se encuentran los conjuntos auxiliares necesarios para poder hacer un uso a plenitud del tren de engranajes con todas las configuraciones. En este módulo se encuentran dos conjuntos auxiliares, formados por un metacrilato y un eje y, por último, un metacrilato auxiliar sin eje.

Como se puede apreciar, el grueso principal del coste total de este bloque se lo llevan los metacrilatos. En total hay 3 metacrilatos, los cuales tienen un coste

5. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

relevante en comparación con el resto de elementos, lo cual supone alrededor del 90% del coste de todo el bloque.

Sin embargo, son un elemento necesario, puesto que, sin los metacrilatos, son parte de estos conjuntos cuya función es el máximo aprovechamiento y optimización del modelo diseñado, para el montaje de todas las configuraciones.

5.2 Resumen del PEM

En este subapartado, se procederá a resumir mediante una tabla los costes de cada módulo por separado, para hallar el coste total del PEM del modelo diseñado. Posteriormente, se realizará un análisis.

Tabla 11: Tabla Resumen del PEM

PEM	Coste
A- Bancada	166,30 €
B- Transmisión	608,96 €
C- Ejes conectores	49,00 €
D- Conjuntos auxiliares	62,16 €
COSTE TOTAL PEM	886,42 €

Como se puede apreciar, el coste total del Presupuesto de Materiales asciende a 886,42 €. Generalmente, este coste del PEM solo sería una parte del presupuesto total de una máquina. Este formaría parte de un Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC), en el que se añaden una serie de gastos generales y el beneficio industrial de la empresa contratada. Por último, se sumarían una serie de gastos de tasas y otros valores que conformarían el Presupuesto Total (PT).

Ahora bien, en el caso particular del proyecto actual, puesto que es un proyecto dirigido por la propia universidad, enfocado hacia la misma universidad, estos dos últimos términos -como son el PEC y el PT- no se deben contemplar, puesto que es un proyecto propio para su autoexplotación. Por lo tanto, el coste del proyecto asciende a 886,42 €.

6. IMPLICACIONES AMBIENTALES

Un aspecto importante para valorar un proyecto es el análisis de su impacto en el medio ambiente. Por lo general, este es un punto con un peso inferior al económico en muchos proyectos, pero en este caso será también un punto a tener en cuenta. Se hará una consideración en profundidad respecto a la fabricación de los componentes, su vida útil y su posterior reciclaje una vez finalizado el ciclo de trabajo. Se valorarán también en función del material de composición. Como último factor, se calculará el coste energético de generar el proyecto.

6.1 Proceso de fabricación

6.1.1 Aceros al carbono y fundición

Las piezas de estos materiales deben ser fundidas a temperaturas muy elevadas de miles de grados, para luego enfriar lentamente mientras se le va dando forma. Esto supone un coste muy importante en cuanto a energía necesaria para realizar el proceso.

En contraposición a este factor adverso, está el origen del material. Cada vez más, se recicla más chatarra³, con lo que el uso de componentes ferrosos cuyo origen del material no proviene de la minería, es menor. Esto supone un factor muy favorable debido al ahorro de costes de minería y extracción de material.

6.1.2 Metacrilato

El metacrilato es un termoplástico transparente y ligero. Como plástico, su origen proviene del petróleo, del cual proviene el propileno y a través del cual se obtiene el ácido acrílico; la polimerización de este último es el que da lugar al metacrilato. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el origen de este material es de un combustible fósil, sería un factor en contra para la elección de este material.

³ Potencias mundiales sacan de la chatarra un tercio de hierro y acero que usan. *La Vanguardia*. Barcelona: Grupo Godó, 29 mayo 2018, ISSN 1133-4835

6. IMPLICACIONES AMBIENTALES

6.1.3 ABS

Sin embargo, haciendo un análisis de mercado, en el que se valoren las distintas alternativas, se considera que este es un material mejor en comparación con otros que ofrecerían el mismo resultado.

Como último material de los diferentes elementos, se encuentra el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Este es el material resultante de los tres materiales, el nitrilo, el butadieno y el estireno, obtenidos todos también, al igual que el metacrilato, del proceso de refinado del petróleo.

6.2 Ciclo de vida útil

En este apartado se valorará el impacto ambiental de cada material en función del ciclo de vida que se espera puedan tener. De nuevo, se estudiarán por separado en función del material de composición.

6.2.1 Aceros al carbono y fundición

Estos dos materiales componen una serie de componentes, como los del ensamblaje de la bancada o los distintos ejes para realizar las diferentes configuraciones. Esto supone que, o bien deban soportar únicamente el peso propio de la máquina, o pequeñas solicitaciones puntuales cuando el alumnado monte cada configuración, con lo que los esfuerzos serían un tiempo muy limitado. Por esta razón, y teniendo también presente que algunos elementos del laboratorio se conservan en muy buen estado pese al paso del tiempo, se podría dar un ciclo de trabajo de por vida para los elementos de estos dos materiales.

6.2.2 Metacrilato

El metacrilato se utilizará para los discos graduados y para los chasis de los módulos de transmisión de los dos trenes. En el caso de los discos graduados no soportarán más que el esfuerzo de los tornillos que lo aguantan, mientras que los chasis soportarían los pequeños esfuerzos que se harían en cada ejercicio.

6. IMPLICACIONES AMBIENTALES

Nuevamente, se podrían considerar componentes de vida infinita, puesto que serían esfuerzos o bien leves, o bien en breves períodos de tiempo.

6.2.3 ABS

El último material, el ABS, es el que compondrá los engranajes y la corona dentada. Estos serán los elementos principales que soportarán los pequeños esfuerzos manuales que apliquen los estudiantes. Por ello, estos serán los elementos de mayores solicitaciones y, cuya vida, debería ser comprobada en función del desgaste. Esto se dejará a criterio del profesor, si bien hay que tener en cuenta que no se utilizarán en ciclos de 8 horas, ni muy frecuentes a lo largo de un año, ni tampoco serán grandes esfuerzos (los esfuerzos que harán los alumnos no serán los que realiza un motor, por pequeño que este sea).

6.3 Proceso de reciclado

Como último factor ambiental, se considerará el proceso de reciclado una vez finalizado el ciclo de vida. De nuevo, se analizará en función del material, incluso en los casos que se consideraba que el ciclo de trabajo era máximo (vida infinita).

6.3.1 Reciclado de los aceros al carbono y la fundición

El reciclado de los componentes metálicos, como se ha anticipado en el proceso de fabricación, es el punto de partida de nueva materia primera. Un ejemplo claro de economía circular, donde los residuos de un proceso son el punto de partida para la fabricación de otros elementos. En definitiva, un impacto ambiental bajo en este sentido.

6.3.2 Reciclado del metacrilato y el ABS

Estos dos materiales se estudian en conjunto por ser los dos termoestables. A diferencia de los termoplásticos, que se queman ante altas temperaturas, los termoplásticos puede ser fundidos para ser nuevamente modelados. Un nuevo caso de economía circular, donde un residuo es la base de un nuevo elemento.

6. IMPLICACIONES AMBIENTALES

6.4 Coste energético de generar el proyecto

Para calcular numéricamente los costes derivados de la generación de este proyecto, se considerará, por un lado, las emisiones generadas por cada transporte al realizar reuniones y, por otro lado, el consumo eléctrico, tanto de iluminación como de alimentación del ordenador.

6.4.1 Coste energético por transportes

El trayecto a considerar es el trayecto en tren (Ferrocarriles Catalanes) entre la estación de Sant Cugat y la de Vallparadís-Universitat, separadas por 15,7 km aproximadamente; el resto del trayecto se hacía caminando. Este trayecto se ha realizado, contando tanta ida como vuelta, 8 veces únicamente (4 días) debido al confinamiento que se instauró a mediados de marzo.

$$d_{TOTAL} = 8 \cdot 15,7 = 125,6 \text{ km} \quad (\text{ecuación 1})$$

Además, según fuentes de la Generalitat de Catalunya, sus trenes emiten 35,77 gramos de CO₂ por cada km de recorrido⁴.

$$Emissions_{Tren} = 125,6 \text{ km} \cdot 0,03577 \text{ kg} \frac{CO_2}{\text{km}} = 4,49 \text{ kg } CO_2 \quad (\text{ec. 2})$$

Este es el coste derivado por el transporte, pero para cuantificarlo debidamente, es necesario tener en cuenta también el consumo de electricidad derivado del diseño y la memoria escrita.

6.4.2 Coste energético por consumo de electricidad.

Este es el coste considerado por el consumo de luz de los electrodomésticos (principalmente el ordenador), y las luces de iluminación. Debido a la situación excepcional, si se valora el proyecto en 600 horas, el ordenador ha sido usado el 90% de este tiempo, para un total de 540 horas. Las luces, en cambio, únicamente se han utilizado alrededor de un tercio de ese tiempo (180 horas).

⁴ Oficina Catalana del Canvi Climàtic (2019). *Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte hivernacle (GEH)* [Dataset]. Oficina Catalana del Canvi Climàtic

6. IMPLICACIONES AMBIENTALES

En cuanto a consumos, el ordenador consume una potencia de 150 W, mientras que las bombillas domésticas tienen una potencia de 14 W al ser LED. Multiplicando cada potencia por su tiempo de uso, se hallará el consumo energético:

$$Energía_{luz} = 150W \cdot 540 \text{ horas} + 14W \cdot 180 \text{ horas} = 83520Wh \quad (\text{ec. 3})$$

Por último, para terminar de cuantificar las emisiones por electricidad, se tomará como dato que el factor de emisión doméstico es de 0,34 kg/kWh:

$$Emisiones CO_{2_{luz}} = 83,52kWh \cdot 0,34 \frac{kg}{kWh} = 28,40 \text{ kg } CO_2 \quad (\text{ec. 4})$$

6.4.3 Coste energético del proyecto

Por último, para determinar la huella del carbono de este proyecto, se sumarán los dos valores obtenidos:

$$Total Emisiones CO_2 = 4,49 + 28,40 = 32,89 \text{ kg } CO_2 \quad (\text{ec. 5})$$

Así, como se acaba de calcular, se han emitido 32,89 kg CO₂ al realizar este proyecto. Sin duda, hay que tener en cuenta que este ha sido ligeramente mayor por la situación de confinamiento que ha ocasionado que muchas reuniones se tuvieran que hacer mediante intercambio de correos electrónicos.

7. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

7. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

Se podrían dividir todas las tareas realizadas en el proyecto en 3 grandes grupos, como serían: una fase de prediseño, para conocer todos los pormenores relativos al objetivo marcado; una segunda fase de diseño, que constituirá el elemento principal en torno al cual girará el resto y, por último, una fase final de análisis y valoración, considerada como la fase del post-diseño.

La planificación global será la siguiente (en la tabla se indica el día que da inicio a cada semana):

Tabla 12: Planificación global del proyecto

	FEBRERO			MARZO					ABRIL				MAYO				JUNIO				
	10	17	24	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29
FASE 1: PREDISEÑO																					
Búsqueda de información																					
Programación del proyecto																					
Estudio de mercado																					
Comparación de las distintas alternativas																					
Realización del Project Charter																					
FASE 2: DISEÑO																					
Diseño del modelo propio																					
Verificaciones del modelo diseñado																					
FASE 3: POST-DISEÑO																					
Análisis económico del modelo final																					
Preparación de los documentos del estudio																					
Redacción del manual de uso e instrucciones																					
Seguimiento de la programación																					

A continuación, se procederá al análisis de cada fase del plan. Como comentario global, se ha marcado cada fase de un color para ver de forma clara y directa el

7. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

peso que representa en el proyecto. Por último, hay un factor independiente, como es el Seguimiento de la Programación, que se realiza a lo largo de todo el proyecto, sin estar englobado ni antes, ni durante, ni después del diseño. Se comentará este detalle también en profundidad.

7.1 Fase 1: Prediseño

Tabla 13: Planificación desglosada de la Fase 1

	FEBRERO			MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO					
	10	17	24	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29
FASE 1: PREDISEÑO																					
Búsqueda de información																					
Programación del proyecto																					
Estudio de mercado																					
Comparación de las distintas alternativas																					
Realización del Project Charter																					

Esta primera fase consiste de todas aquellas etapas necesarias para obtener los conceptos necesarios para el buen diseño de las nuevas prácticas. Así, se da inicio con una búsqueda de información, necesaria para dar inicio a todo el proyecto. Así, se puede realizar la segunda etapa, en la que se planifican todas las operaciones necesarias, así como la asignación del “*timing*” para cada una.

La segunda parte de esta primera fase, tiene que ver con toda la parte derivada del estudio de mercado. Con ello, se centra en conocer las distintas alternativas que existen en el mercado, para hacer un análisis de los posibles problemas que se pueden presentar. En el caso de este proyecto, en esta parte se analizaba el modelo de prácticas que se está siguiendo, para posteriormente valorar posibles puntos débiles y fortalezas.

Por último, y para finalizar esta fase de prediseño, se redacta el “*Project Charter*”, con las líneas maestras a seguir para la consecución satisfactoria del proyecto.

7. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

7.2 Fase 2: Diseño

Tabla 14: Planificación desglosada de la Fase 2

	FEBRERO			MARZO					ABRIL				MAYO				JUNIO				
	10	17	24	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29
FASE 2: DISEÑO																					
Diseño del modelo propio																					
Verificaciones del modelo diseñado																					

En esta segunda fase, se realiza toda la parte más creativa del proyecto. En esta se diseña el nuevo modelo junto con las nuevas prácticas a realizar por los estudiantes, teniendo en cuenta todas las consideraciones extraídas después de la fase analítica realizada en la primera fase.

Después de completar el diseño, se realizan las verificaciones y correcciones pertinentes. Esta etapa es, con diferencia, la etapa principal del proyecto. Esto se debe a que en esta fase interviene la función del profesor, cuyo tiempo y disponibilidad es más ajustado. Además, esta etapa cuenta con cierto margen extra para poder atender posibles imprevistos acaecidos hasta este punto que hayan podido retrasar el plan.

7.3 Fase 3: Post-Diseño

Tabla 15: Planificación desglosada de la Fase 3

	FEBRERO			MARZO					ABRIL				MAYO				JUNIO				
	10	17	24	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29
FASE 3: POST-DISEÑO																					
Análisis económico del modelo final																					
Preparación de los documentos del estudio																					
Redacción del manual de uso e instrucciones																					

7. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

La fase de diseño viene precedida por la de post-diseño, una fase en la que se valora todo el proceso realizado y se analiza, además de la preparación pertinente de los documentos necesarios para el uso de los usuarios.

Así, se darán tres etapas. Una primera etapa de análisis económico, en la que se resuman todos los costes posibles que la puesta en práctica del proyecto pueda ocasionar. Una segunda etapa en la que se preparen y redacten todos los documentos. Esto es, la justificación paso a paso de las decisiones tomadas, así como un informe del desarrollo seguido.

Y, por último, siendo un aspecto necesario teniendo en cuenta el proyecto realizado, está la redacción de un manual de instrucciones. Esto es un elemento importante en toda máquina, pero más especialmente cuando va a ser utilizada por alumnos y con una metodología de “*flipped-classroom*”, en la que deben saber llevarla a cabo por su cuenta, de forma totalmente autónoma. Solo así se entendería la intervención mínima del profesor de prácticas.

7.4 Seguimiento de la programación

Tabla 16: Planificación de seguimiento del proyecto

	FEBRERO			MARZO					ABRIL				MAYO				JUNIO				
	10	17	24	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29
Seguimiento de la programación																					

Cómo último punto y, al margen de las tres principales fases, se encuentra el seguimiento de la programación. Este es un proceso que se indica al margen, puesto que no forma parte de ninguna de las tres fases propiamente, puesto que forma parte de las tres a la vez.

Este apartado es el que se encarga de ratificar que se cumpla la planificación estipulada en la etapa correspondiente de la primera fase. Así, debe ser un proceso continuo para evaluar en todo momento el estado del proyecto, y si debe haber algún tipo de cambio debido a posibles imprevistos o también adelantos.

Además, se realiza tanto por parte del alumno como del profesor, a través de los seguimientos que se realizan desde la plataforma de Atenea. Sin duda, un apartado indispensable para el buen devenir de cualquier proyecto.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Una vez realizado el estudio y el diseño de las nuevas prácticas de laboratorio, se han extraído diversas conclusiones que se expondrán a continuación. Para ello, se hará un breve resumen previo al análisis final.

8.1.1 Resumen del proyecto

Se ha realizado un breve estudio histórico, para analizar la viabilidad de las prácticas, o bien debían sustituirse por otros elementos más actuales en la industria, pero se ha visto como son un elemento muy importante en las cajas de cambios automáticas en automoción, en mecanismos diferenciales y en otros campos.

En segundo término, se ha analizado más específicamente el modelo de doble tren del laboratorio y se ha propuesto un nuevo diseño junto con un nuevo guion de prácticas para la sesión de laboratorio. De este diseño, se ha analizado su impacto ambiental y el coste económico que supondría.

8.1.2 Conclusiones extraídas

Se ha diseñado un nuevo modelo de prácticas con trenes epicicloidales, con un coste más de 7 veces menor respecto al modelo existente actual, lo cual supone un desembolso mucho menor para la escuela. Además, es fabricable mediante máquinas y herramientas disponibles en el taller. Esto supone también una amortización de la inversión hecha previamente. Como último detalle, se ha logrado un diseño con piezas normalizadas según normativa europea y no imperial, de forma que se facilita la búsqueda de recambios en caso de necesidad.

En tercer lugar, se ha desarrollado un guion de prácticas acorde a los estándares de enseñanza recomendados en la actualidad, en los que el alumno obtiene los conocimientos de forma autónoma y con una aportación del profesorado mucho menor en comparación con las clases magistrales.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por último, el modelo propuesto cumple en cuanto a impacto ambiental, con un impacto leve por el uso de materiales reciclables y de larga vida útil.

8.1.3 Valoración personal

En último término, antes de comentar las diferentes posibilidades para continuar con este proyecto, se comentarán también ciertos conocimientos adquiridos al realizar el proyecto, así como algunas dificultades que han aparecido.

Al no realizarse en el Grado en ingeniería mecánica una asignatura dedicada a engranajes -hay una pequeña parte en una optativa, pero los conocimientos han sido muy básicos en comparación con lo necesario para este proyecto-, se ha hecho una parte previa para adquirir unos conocimientos mínimos necesarios para este proyecto.

Además, ha habido ciertas dificultades relacionadas con la crisis del coronavirus y todo lo que ha conllevado. Si bien el contacto con los tutores y las correcciones se han hecho vía correo electrónico, no se ha podido ni realizar un estudio más profundo de los modelos utilizados en el laboratorio, con lo que también ha supuesto un punto de problemas a la hora de no conocer más que de forma superficial los modelos experimentales a disposición de los alumnos.

Como última dificultad, no se ha podido realizar una parte prevista inicialmente como era la fabricación de los componentes dentro del proyecto, por la imposibilidad de acceder a la universidad ni al taller. Por ello, se ha suprimido esta parte.

Dicho esto, se considera que el resultado final es muy bueno y debe ser una base para que la ESEIAAT siga adaptándose a los métodos de enseñanza considerados óptimos, y pueda seguir formando a más alumnos satisfactoriamente cada año.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.2 Recomendaciones

Como recomendaciones para continuar el proyecto, se plantean diversas posibilidades. Algunas parten de aquellos puntos que no se han podido realizar en este por las circunstancias del confinamiento.

Por ejemplo, el proyecto ha quedado listo para fabricación y montaje. Un aspecto interesante sería el seguimiento de todos los procesos de fabricación de los componentes, estudiando también todas las etapas minuciosamente desde que salen de oficina técnica hasta que se llevan a cabo como productos reales.

Un segundo detalle, más enfocado a la parte de enseñanza, sería la absorción por parte del modelo de prácticas, de la práctica de cambiar engranajes y comprobar la influencia del número de dientes en las reducciones y multiplicaciones que se dan. Si de estas dos prácticas se hace una, se reducen las sesiones experimentales de laboratorio para ganarlo en tiempo de análisis posterior de parte de los estudiantes.

Esto es posible gracias al diseño con piezas normalizadas según normativas europeas, que facilitan el montaje y el desmontaje de las distintas piezas. Para llevarlo a cabo, en lugar de diseñar dos satélites diferentes de 20 y 21 dientes en cada tren, respectivamente, se podrían diseñar tres tipos de satélites, para uno de los dos trenes, de 20, 21 y 22 dientes. Estos se deberían sustituir para ver la influencia de ese diente extra que se añade o se quita en cada caso.

En último término, en vista de seguir innovando el proyecto, aun a costa de encarecerlo, se podrían diseñar todas las piezas de plástico, bien sean de metacrilato o mediante fabricación aditiva, para apostar definitivamente por materiales más modernos que son la base de los estudios actuales.

En este sentido, puestos también a hacer un proyecto totalmente eco-friendly, otra posibilidad sería la de desarrollar todo el material con madera, aunque esto también supondría un coste bastante elevado, además del mayor mantenimiento necesario que habría que hacerle.

9. BIBLIOGRAFIA

[1] Berto, Frank J.; Tony Hadland; Ron Shepherd; et al. (2008) [2000]. *The Dancing Chain: History and Development of the Derailleur Bicycle* (3rd ed.). San Francisco, CA, USA: Cycle Publishing/Van der Plas Publications. p. 34. ISBN 978-1-892495-59-4.

[2] Blance, A. "Living with a Rohloff Hub" [artículo de blog]. En: Thornston [en línea]. Diciembre de 2007. [Consultado el: 21 de febrero 2020]. Disponible en:

<<https://web.archive.org/web/20081227004350/http://www.thorncycles.co.uk/thornpdf/ThornLivingWithARohloff.pdf>>

[3] Bookwheel. En: Wikipedia [en línea]. Wikimedia Foundation, 2018. [Consultado 23 febrero 2020]. Disponible en:

<<https://en.wikipedia.org/wiki/Bookwheel>>

[4] Essam EL. Esmail (2016-01-13). "Configuration design of ten-speed automatic transmissions with twelve-link three-DOF Lepelletier gear mechanism". *Journal of Mechanical Science and Technology*. Número 30: páginas 211–220. DOI:10.1007/s12206-015-1225-4

[5] Ford R. Bryan, *Henry's Lieutenants* (Chicago: Wayne State University Press, 1993), ISBN 0-8143-2428-2.

[6] Franco Balderas, S. *Reciclado de ABS (acrilonitrilo Butadieno Estireno)* [en línea]. Trabajo de Fin de Máster, Campus Monterrey, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. División de Ingeniería y Arquitectura, 2003. [Consulta: 26 de mayo 2020]. Disponible en:

<https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/569376/DocsTec_1207.pdf?sequence=1>

[7] Georgano, N. *Cars Early and Vintage 1886-1930*. Londres: Grange-Universal, 1985. ISBN 978-0-9509620-3-0

[8] Hub gear. En: Wikipedia [en línea]. Wikimedia Foundation, 2018. [Consultado 23 febrero 2020]. Disponible en:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Hub_gear>

9. BIBLIOGRAFIA

[9] Hormigo D.. Consulta de precios para Impresión 3D [correo electrónico]. Mensaje para Appart810. 1 de junio 2020 [Consulta: 1 de junio de 2020]. Comunicación personal.

[10] Jurado Galiano, J. *Estudio de un cambio de marchas por trenes epicicloidales para bicicletas*. [en línea]. Trabajo de fin de Grado, UPC, Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrassa. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2014. [Consulta: 21 de febrero 2020]. Disponible en:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21976/javier.jurado_102009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[11] Levai Z. Structure and Analysis of Planetary Gear Trains. *Journal of Mechanisms*. Publicado el 9 febrero 1968, en Gran Bretaña. Volumen 3, páginas 131-148. Disponible en:

<https://web.archive.org/web/20130613001239/http://lezo.hu/5_legfontosabb/bolygomu.pdf>

[12] Mejías Blázquez, J. Diseño de una caja de cambios automática epicicloidal de 6 marchas [en línea]. Trabajo de fin de Grado, UPM, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Industrial, 2017. [Consulta: 21 de febrero 2020]. Disponible en:

< http://oa.upm.es/48081/1/TFG_JESUS_MEJIAS_BLAZQUEZ.pdf>

[13] Nash, Frederick C. (18 de septiembre de 1980) [1970]. Fundamentos de mecánica automotriz [Automotive fundamentals]. Traducido por Ing. Juan José Blanco (12 edición). México .F.: Editorial Diana. p. 293.

[14] Oficina Catalana del Canvi Climàtic (2019). *Guia pràctica per al càlcul d'emissions de gasos amb efecte hivernacle (GEH)* [Dataset]. Oficina Catalana del Canvi Climàtic [Consulta 17 junio 2020]. Disponible en:

<https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04_ACTUA/Com_calcular_emissions_GEH/guia_de_calcul_demissions_de_co2/190301_Guia-practica-calcul-emissions_CA.pdf>

[15] Potencias mundiales sacan de la chatarra un tercio de hierro y acero que usan. *La Vanguardia*. Barcelona: Grupo Godó, 29 mayo 2018, ISSN 1133-4835. Disponible en:

<<https://www.lavanguardia.com/vida/20180529/443934239376/potencias-mundiales-sacan-de-la-chatarra-un-tercio-de-hierro-y-acero-que-usan.html>>

[16] Ros Gálvez, A; Rosa-García, A. Uso del vídeo docente para la clase invertida: Evaluación, ventajas e inconvenientes. *Vectores de la pedagogía docente actual*. [en línea]. Murcia, 2014. Editorial ACCI, págs. 423-441. ISBN 9788415705284. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/profile/Alfonso_Rosa-Garcia/publication/266673438_Uso_del_video_docente_para_la_clase_invertida_evaluacionventajas_e_inconvenientes/links/570c9bb608aea660813b2c87/Uno-del-video-docente-para-la-clase-invertida-evaluacion-ventajas-e-inconvenientes.pdf>

[17] Simpson planetary gearset. En: Wikipedia [en línea]. Wikimedia Foundation, 2018. [Consultado 22 febrero 2020]. Disponible en:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Simpson_planetary_gearset>

[18] Wright, M. T. "The Antikythera Mechanism reconsidered" *Interdisciplinary Science Reviews*, 2007. London: Institute of Materials, Minerals and Mining. Volumen 32 número 1. DOI 10.1179/030801807X163670