

Capítulo 2: CVT DINÁMICA FYW-5

Aunque ya está diseñada, analizada y fabricada, es importante, para entender el funcionamiento de la CVT Fyw-5 y los capítulos posteriores de este proyecto, realizar un estudio previo del comportamiento de la misma.

El elemento principal de la CVT es un tren epicicloidal simple, en el cual el eje de entrada está conectado al portasatélites y el de salida al planeta, estando la corona libre. Su funcionamiento se basa en producir aceleraciones y deceleraciones en la corona que hace que se transmitan unos esfuerzos al planeta capaz de vencer el par resistente que haya a la salida. Para que se produzcan las aceleraciones y deceleraciones necesarias en la corona, la velocidad de entrada del portasatélites (ω_e) debe ser de forma senoidal. Esta señal senoidal puede ser de dos tipos: centrada en cero o desplazada. Mecánicamente, la señal senoidal centrada en cero se puede conseguir mediante un sistema de manivela-balancín acoplado al portasatélites. La señal senoidal desplazada se puede obtener usando el sistema de disco rasurado desarrollado por este departamento, o usando engranajes elípticos.

En este capítulo se estudiará el comportamiento del tren epicicloidal ante los dos tipos de señales de entrada descritas para ver cual de ellas ofrece mayores ventajas. Posteriormente se incluirá el accionamiento elegido al tren epicicloidal para estudiar su comportamiento al variar parámetros como la velocidad de entrada, inercia de la corona, el par resistente a la salida, etc.

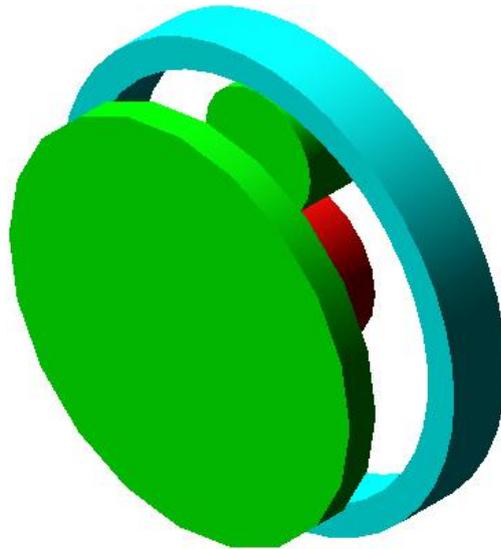
2.1.-) EL TREN EPICICLOIDAL SIMPLE

Se trata de un tren de engranajes formado por un piñón planetario y unos piñones satélites que giran a su alrededor, una corona exterior dentada que circunda el conjunto y un portasatélites. Cuando gira el portasatélites, los piñones satélites se mueven a su alrededor y hacen girar al piñón planetario y a la corona exterior.

Manteniendo fijos cualquiera de los tres elementos del conjunto, se hacen girar los otros dos y se obtienen diferentes relaciones de velocidad de giro, jugando con las distintas combinaciones posibles. En el caso de esta CVT el eje de entrada estará conectado al portasatélites y el eje de salida estará conectado al planeta y sobre el cual introduciremos un par que se oponga al movimiento para simular varias situaciones de conducción. La corona estará libre y será el elemento regulador.

A continuación se hará un modelo de un tren epicicloidal en el programa ADAMS, que cumpla las características descritas anteriormente y se realizarán una serie de simulaciones par estudiar su comportamiento. Los elementos serán: planeta, satélites, portasatélites y corona, que se relacionarán entre ellos mediante pares de engranaje. El resultado puede verse en la figura 2.1.

Last_Run Time= 0.0000 Frame=1



Last_Run Time= 0.0000 Frame=1

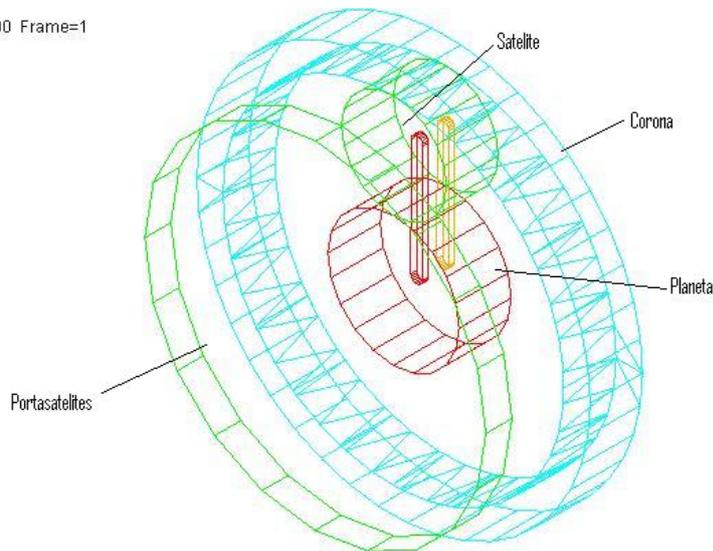


Figura 2.1

El modelo se ha simulado con un único satélite, ya que para el estudio a realizar no se necesitan todos y el modelo queda más sencillo.

Una vez construido el modelo se verá su comportamiento ante dos tipos de señales de entrada:

- Señal senoidal centrada en cero, de la forma $\omega_e = A \sin(\omega t)$
- Señal senoidal desplazada, de la forma $\omega_e = B + A \sin(\omega t)$.

2.1.1.-)SEÑAL SENOIDAL CENTRADA EN CERO

Se introduce una señal del tipo $\omega_e = \sin(\omega * t)$, donde ω_e será la velocidad angular de giro del portasatélites y ω la frecuencia de la señal, que en este caso se tomará como 2 rad/s. Haciendo la simulación sin par resistente en el planeta se obtiene la señal que muestra la figura 2.2.

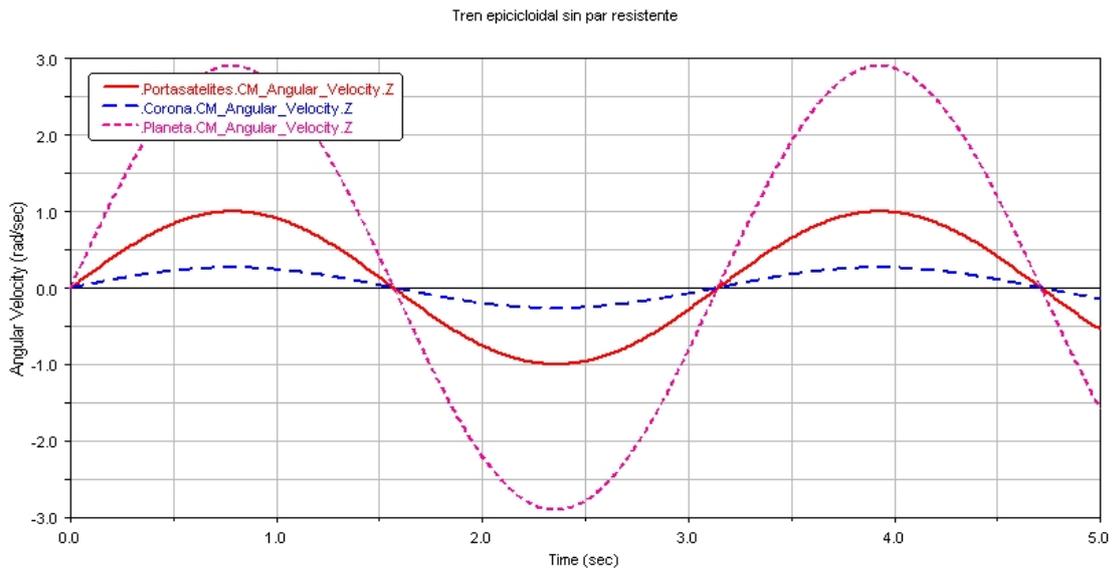


Figura 2.2: Velocidades de los elementos sin par resistente

Puede verse que al introducir una señal senoidal centrada en cero a la entrada se obtiene una señal parecida (centrada en cero) tanto en la corona como con el planeta, y todas en la misma fase. La corona apenas tiene movimiento, así que en esta situación toda la energía a la entrada se está transmitiendo casi íntegramente a la salida. La salida (el planeta en este caso), puede verse que tiene componentes tanto positivas como negativas. Ésto hay que tenerlo en cuenta cuando se quiera introducir un par resistente en el planeta. El par resistente es el encargado de simular las situaciones a las que se verá sometida la transmisión, es decir, las fuerzas que se oponen al movimiento como la resistencia a la rodadura, el subir una pendiente, etc. Para que en todo momento el par se oponga al movimiento del planeta, se pondrá éste proporcional a su velocidad y que se oponga a la misma, de la forma $\text{Par} = -k\omega_e$. Introduciendo un par a la salida del tren se obtiene la figura 2.3.

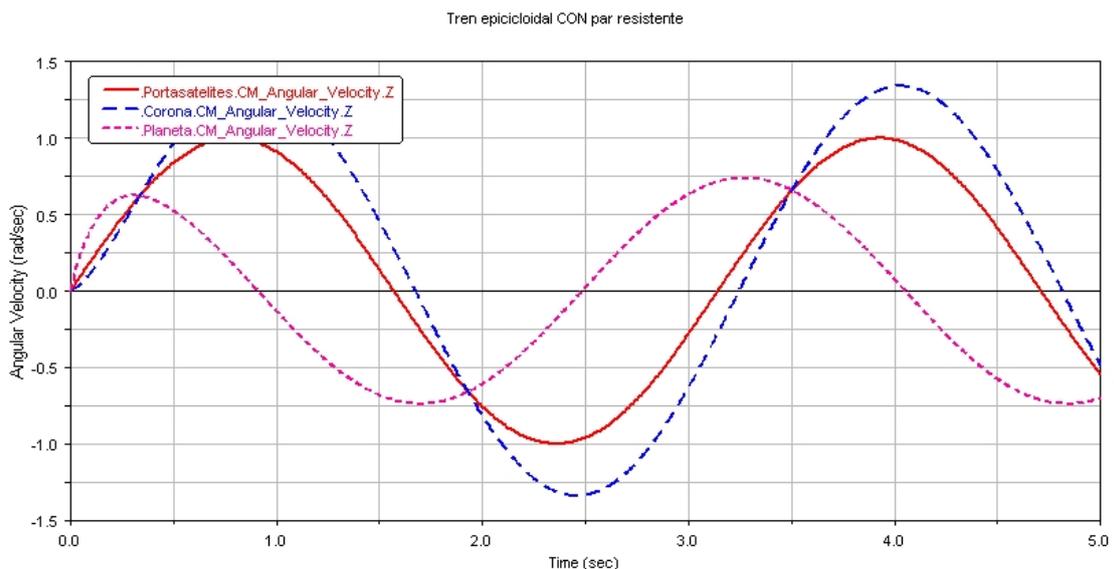


Figura 2.3: Velocidades de los elementos con par resistente

Puede verse que las señales de salida siguen siendo centradas en cero, pero se observa cómo la corona tiene una mayor importancia en el sistema. También se ve que

las señales están desfasadas y la relación existente entre la corona y el planeta: cuando una alcanza su máxima velocidad, la otra está a cero y viceversa, y que existe un punto en cada ciclo donde las velocidades de los tres elementos coinciden.

2.1.2.-)SEÑAL SENOIDAL DESPLAZADA

La señal de entrada en este caso será una senoidal desplazada, es decir, de la forma: $\omega_e = \sin(\omega * t) + \mathbf{B}$, donde ω_e será la velocidad angular de giro del portasatélites, ω la frecuencia de la señal, que seguirá siendo 2 rad/s, y \mathbf{B} será el desplazamiento respecto a cero, que en este caso se tomará como 2. Introduciendo esta señal en el portasatélites y sin poner un par resistente se obtiene la señal de la figura 2.4.

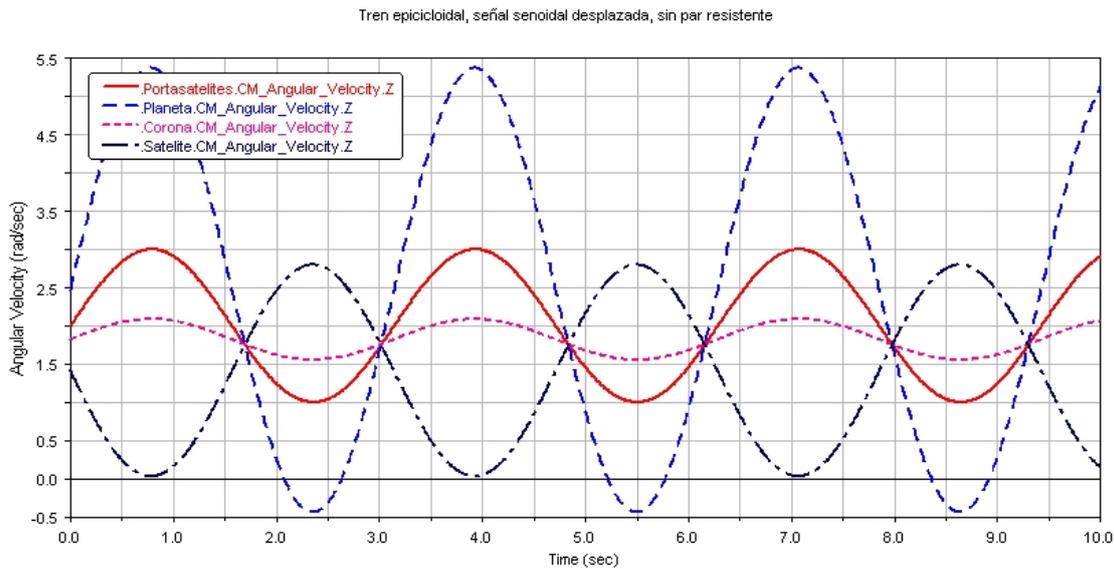


Figura 2.4: Velocidades de los elementos sin par resistente

Puede verse que todos los elementos se encuentran en la misma fase, excepto el planeta que se encuentra desfasado $\pi/2$ radianes, y todos están desplazados verticalmente entre sí. Hay un par de puntos en cada periodo en que las velocidades coinciden. De nuevo se tiene que la corona apenas interviene debido a que no existe par resistente en el eje de salida.

Si de nuevo se introduce un par de salida que se oponga al movimiento del planeta en todo momento, los resultados que se obtienen son mostrados en la figura 2.5.

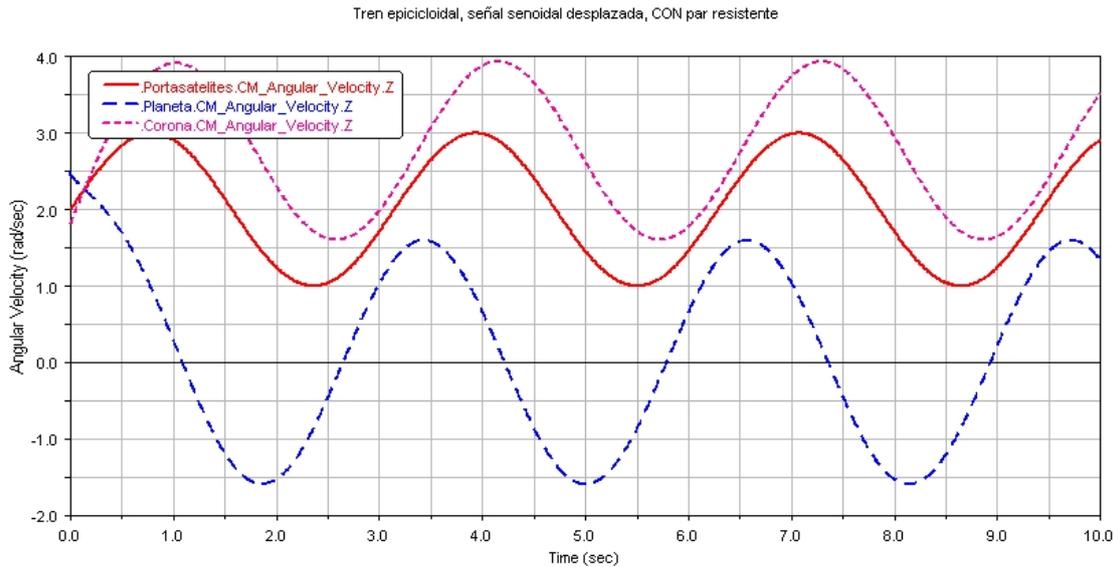


Figura 2.5: Velocidades de los elementos con par resistente

Se obtiene un resultado muy importante, la salida es una señal que en régimen permanente tiende a ser centrada en cero (existe un transitorio inicial donde no es así). Por tanto, se abre un gran abanico de posibilidades constructivas para la excitación del tren epicicloidal, teniendo en cuenta que la señal de salida, en régimen permanente, tiende a ser la misma.

Haciendo un análisis de las potencias puestas en juego en ambas situaciones, se ve una diferencia muy importante en su comportamiento.

2.1.3.-) ANÁLISIS DE POTENCIAS

Para ver la diferencia en el comportamiento interno del sistema ante los dos tipos de señales introducidas, se hace un análisis de la potencia consumida y cedida por cada uno de los elementos: portasatélites (entrada), corona y planeta (salida). Para ello se estudia cada caso por separado:

a.-) Señal senoidal centrada en cero

Para cada uno de los elementos la potencia viene dada por:

$$P_{ent} = Par_{ent} * \omega_{ent} \text{ (Para el portasatélites)}$$

$$P_{sal} = Par_{sal} * \omega_{sal} \text{ (Para el planeta)}$$

$$P_{cor} = -\omega_{cor} * \alpha_{cor} * I_{cor} \text{ (Para la corona)}$$

Se representan las tres potencias, junto con la velocidad de entrada para ver el comportamiento de un ciclo.

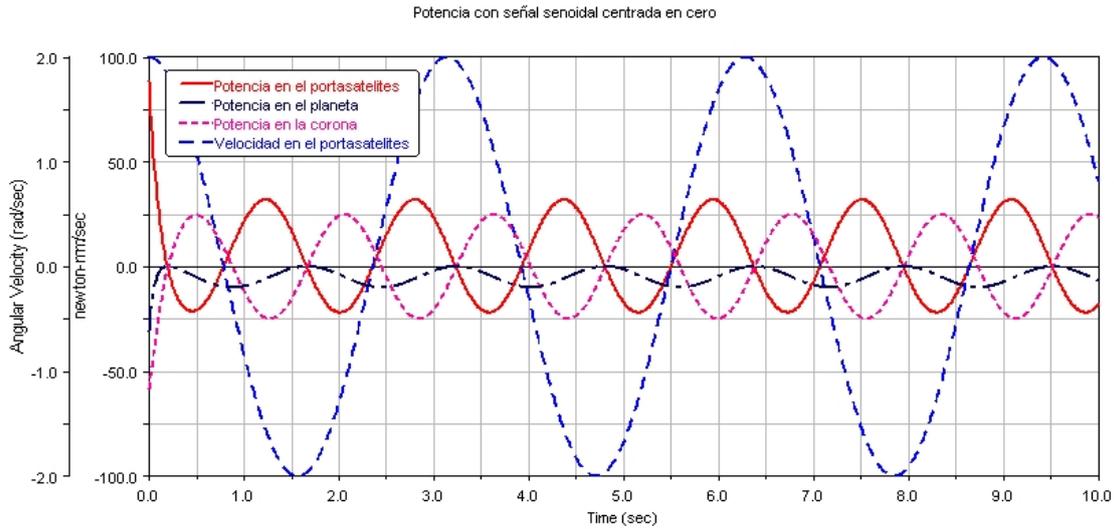


Figura 2.6: Potencias con señal de entrada centrada en cero

Puede verse que por el portasatelites entra y sale potencia, aunque de forma global, consume energía, que debe ser la misma que esta absorbiendo el planeta para vencer el par que se le opone, como puede verse en la figura 2.7. La corona va consumiendo y cediendo potencia con lo que globalmente no consume ni cede energía. Y del planeta puede verse que siempre sale potencia.

Se comprueba que en todo momento el balance de potencia en el sistema completo es nulo $\Sigma Pot = 0$. (Para ello se ha despreciado la masa de todos los elementos excepto la de la corona)

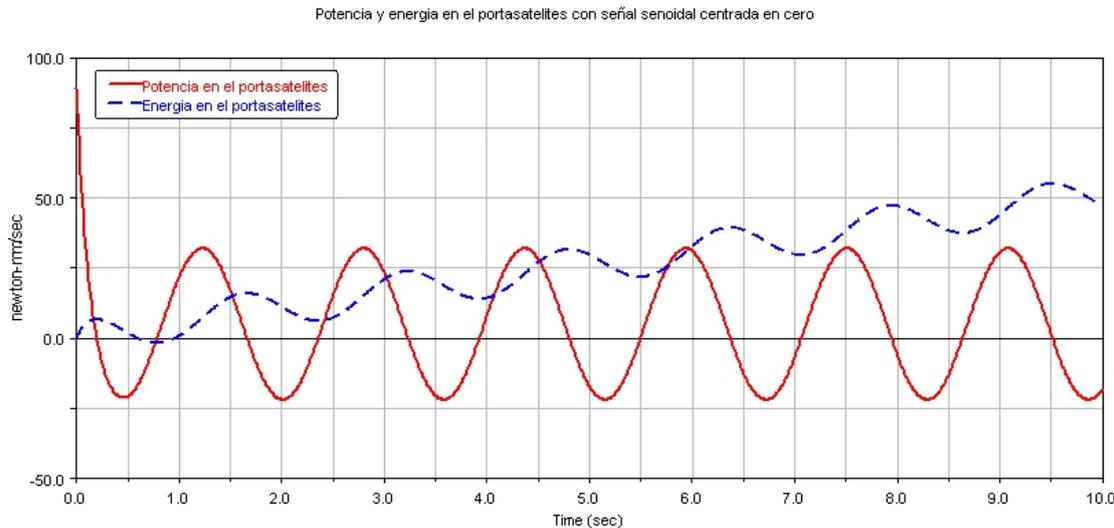


Figura 2.7: Potencia y energía de entrada con señal centrada en cero

Haciendo un zoom en un ciclo, se puede analizar en comportamiento del sistema:

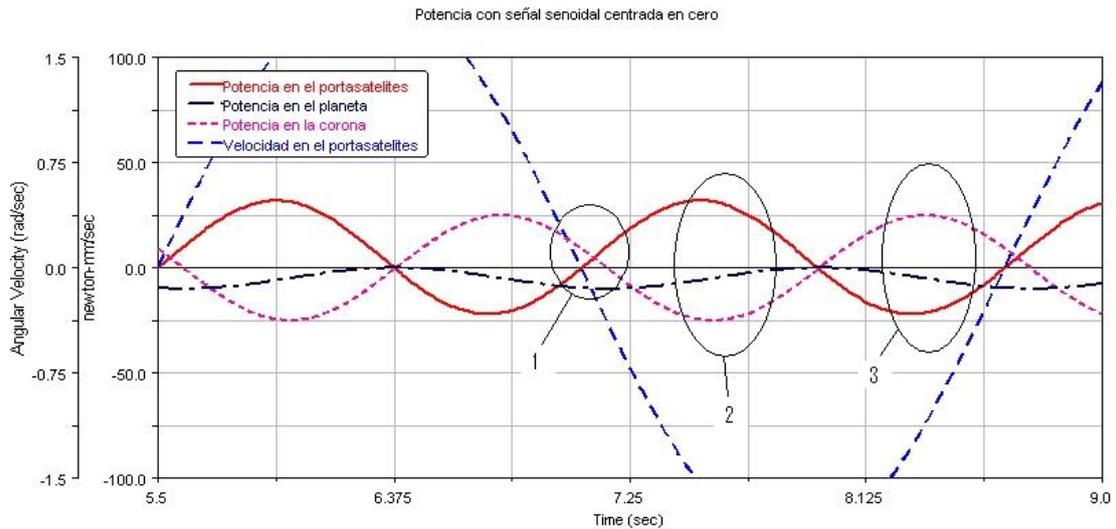


Figura 2.8: Potencia con señal de entrada centrada en cero

Se pueden diferenciar claramente tres comportamientos en cada semiciclo:

- 1.- La corona y el portasatélites están cediendo potencia al planeta. Este es el estado más interesante, porque los dos elementos ceden potencia a la salida.
- 2.- El portasatélites está cediendo potencia a la salida (planeta) y a la corona, es decir, la potencia de entrada se emplea en acelerar la corona y vencer el par de salida
- 3.- La corona está cediendo potencia al portasatélites y al planeta. Al decelerarse la corona, cede potencia tanto a la entrada (el motor debe ser capaz de absorber esa potencia) como a la salida para vencer el par, provocando así una reducción del rendimiento del sistema.

b.-) Señal senoidal desplazada

Haciendo un análisis similar al anterior se obtiene que:

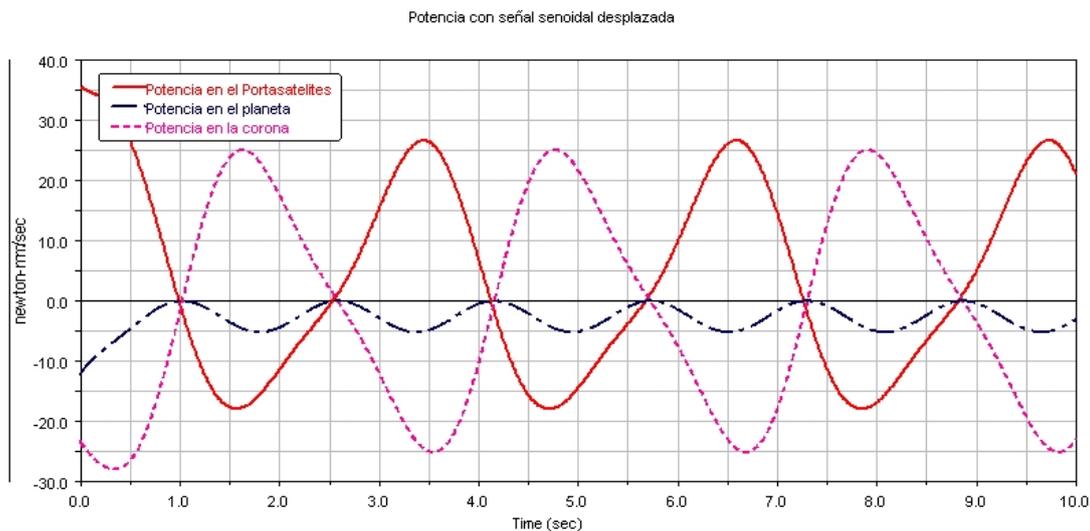


Figura 2.9: Potencia con señal de entrada desplazada

La entrada (el portasatélites) cede y consume potencia, siendo el balance global que cede. La potencia en la corona es una señal periódica centrada en cero, con lo que globalmente no cede ni absorbe energía. Y la salida (el planeta) consume potencia en todo momento.

La gran diferencia con el caso anterior radica en que en este caso se tienen dos modos de funcionamiento:

- 1.- El portasatélites cede potencia a la corona y al planeta.
- 2.- La corona cede potencia al portasatélites y al planeta.

Por tanto se ha perdido el modo de funcionamiento más interesante, es decir, aquel en el que tanto el portasatélites como la corona están cediendo potencia a la salida.

2.1.4.-) CONCLUSIONES

De este análisis se sacan dos grandes conclusiones. La primera es que tanto si la señal de entrada es una señal senoidal centrada en cero como si es una señal senoidal desplazada, la salida del sistema será una señal centrada en cero. Esto es debido a las características del tren epicicloidal que se ha tomado.

La segunda es que si la entrada es una señal senoidal centrada en cero se obtiene un modo de funcionamiento más que si la entrada fuera una senoidal desplazada. Aquel en el que tanto el portasatélites (entrada), como la corona están cediendo potencia al planeta (salida) para vencer el par resistente aplicado en éste.

La entrada se hará mediante una manivela-balancín para que la señal de entrada en el portasatélites sea aproximadamente una senoidal centrada. Se puede comprobar que esto es cierto para excentricidades pequeñas, y que si la biela fuera de longitud infinita, la señal sería exactamente una senoidal centrada.

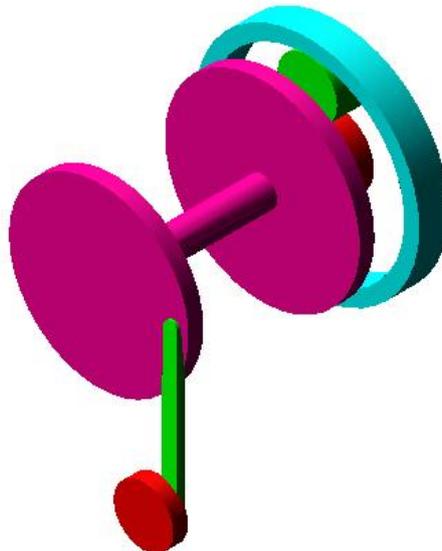
2.2.-) MODELO DE CVT DINÁMICA

Para conocer un poco mejor el funcionamiento del sistema de transmisión, se realizará un modelo sencillo de la CVT dinámica que es objeto de estudio. Sobre dicho modelo se tendrá una serie de variables que se podrán modificar para ver como varía su comportamiento, como puede ser: la inercia de la corona, la excentricidad de la manivela-balancín, etc.

2.2.1.-) MODELO

El modelo más simple que se puede realizar consta de un tren epicicloidial como el del apartado anterior al que se le añade el accionamiento de manivela-balancín. Dicho modelo puede verse la figura 2.10.

Last_Run Time= 0.0000 Frame=1



Last_Run Time= 0.0000 Frame=1

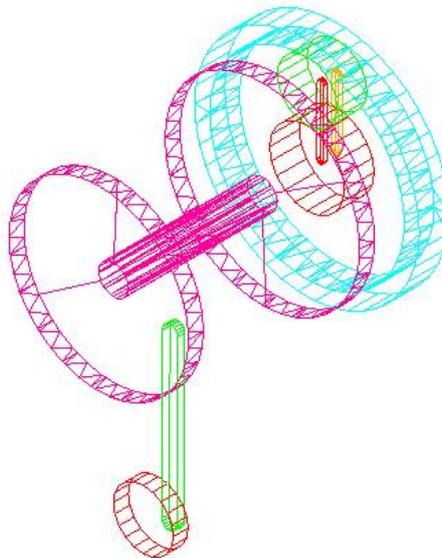


Figura 2.10

Para este estudio previo se introducirán señales de entrada en la manivela, tanto en velocidad angular como en par, y se estudiará la salida, que este caso sería un eje conectado al planeta, así como el comportamiento del resto de los elementos, como, por ejemplo, la corona, para entender mejor el funcionamiento de este tipo de transmisiones.

2.2.2.-) VELOCIDAD DE ENTRADA CONSTANTE

En esta primera simulación simplemente se introducirá una velocidad en la manivela, y un par que se oponga al movimiento en el planeta. Así se podrá, además de estudiar el comportamiento de todos los elementos del sistema, ver el funcionamiento del mismo, y se tendrá una base con la que comparar las distintas simulaciones variando una de las características de la transmisión, manteniendo el resto constante, es decir, por ejemplo, si se aumenta la velocidad de entrada, se mantendrá constante la inercia de la corona, el par de salida, y la excentricidad de la manivela, para comparar los resultados con los de esta primera simulación.

La velocidad en este caso será constante, aunque para evitar que ésta entre bruscamente en el sistema, creando picos de par que pueden falsear los resultados, se multiplicará por el factor $(1-e^{-t})$ haciendo que se alcance la velocidad constante de una forma más suave y más cercana a la realidad.

En cuanto al planeta, su comportamiento cuando no tiene oposición alguna es como se muestra en la siguiente gráfica:

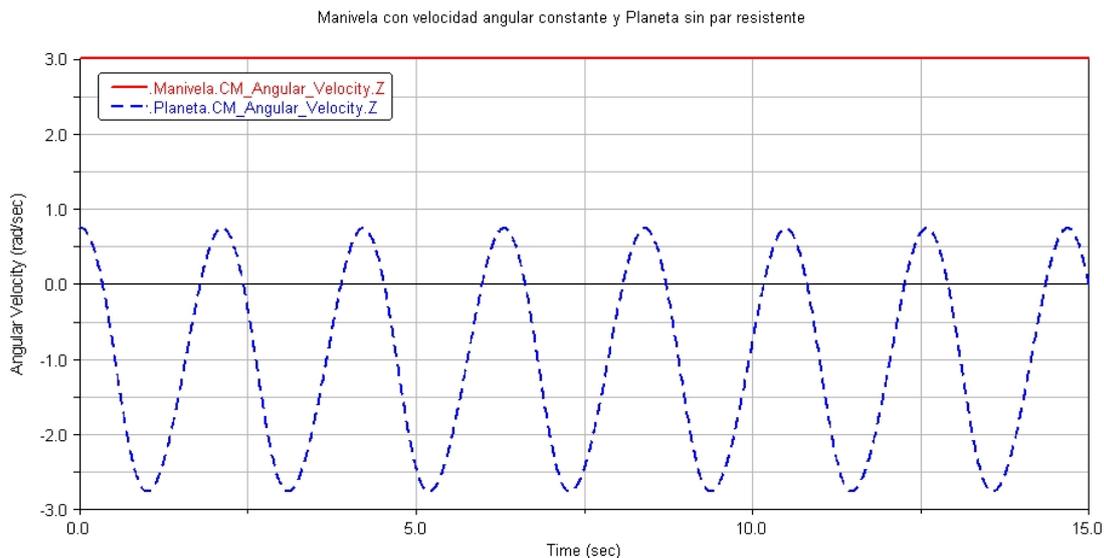


Figura 2.11: Velocidades de entrada y salida sin par resistente

Como puede verse en la figura 2.11, al introducir una velocidad angular constante en la manivela, la salida, en este caso el planeta, va cambiando constantemente su sentido de giro, en una señal aproximadamente de forma senoidal. Para poder aplicarle un par resistente, se debe tener en cuenta esta situación. Para ello se introducirá un par al planeta que sea proporcional a la velocidad angular del mismo y que se oponga al movimiento en todo instante. Haciendo ésto se obtiene:

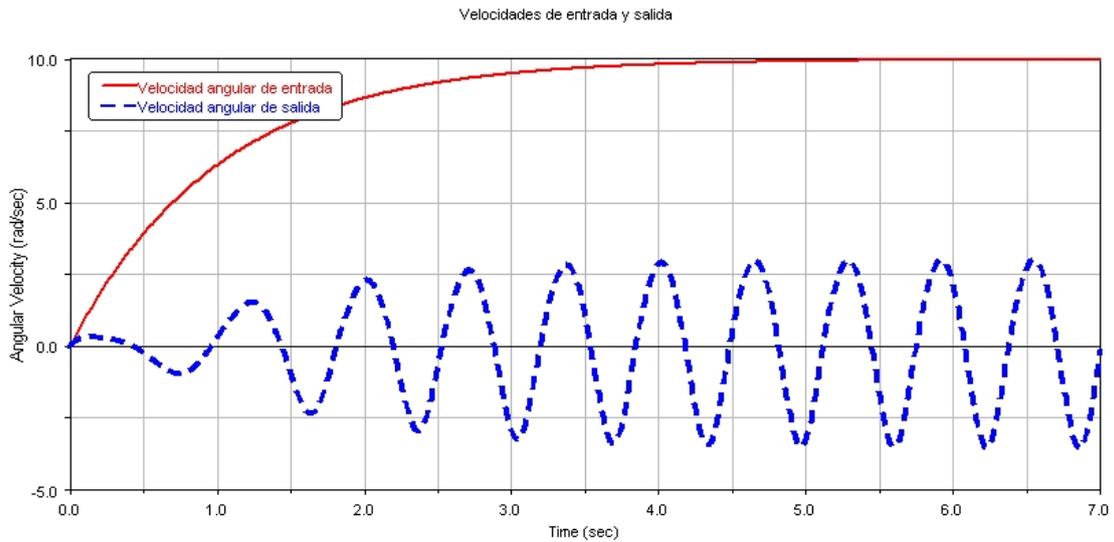


Figura 2.12: Velocidades de entrada y salida con par resistente

En la figura 2.12 se ve que la velocidad de salida tiende a una senoidal centrada, cosa que era de esperar, y que con la disposición de la manivela-balancín que se ha utilizado, la entrada en el portasatélites se asemeja a una senoidal centrada en cero.

Los pares de entrada y salida son:

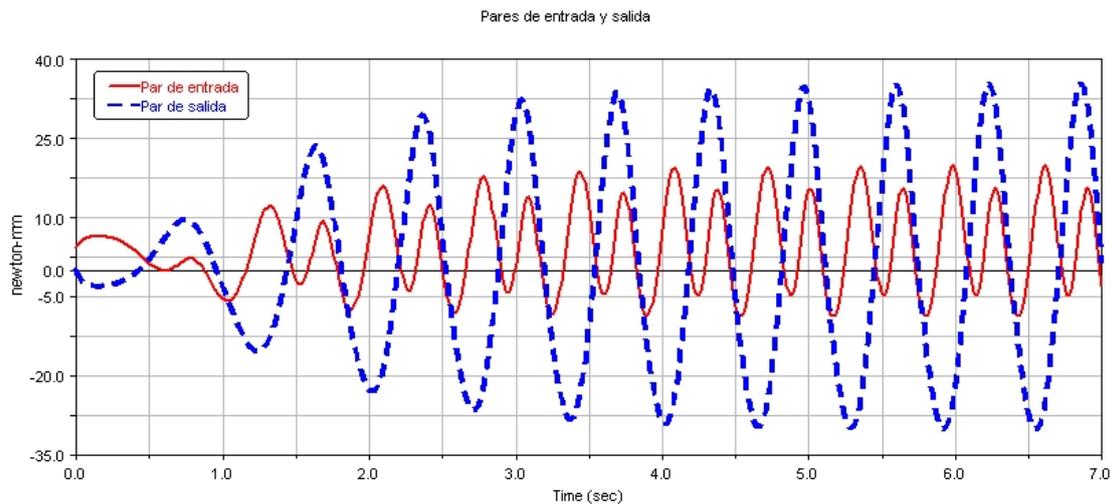


Figura 2.13: Par de entrada y salida

Como se observa en la figura 2.13, el par de salida sigue una ley senoidal centrada en cero, y el par de entrada no es simétrico, debido a que el par a la salida no es muy grande

Las potencias vienen dadas por:

Potencia en la manivela: $P_{ent} = Par_{ent} * \omega_{ent}$

Potencia en el planeta: $P_{sal} = Par_{sal} * \omega_{sal}$

Potencia en la corona: $P_{cor} = -\omega_{cor} * \alpha_{cor} * I_{cor}$

Representándolas gráficamente se tiene:

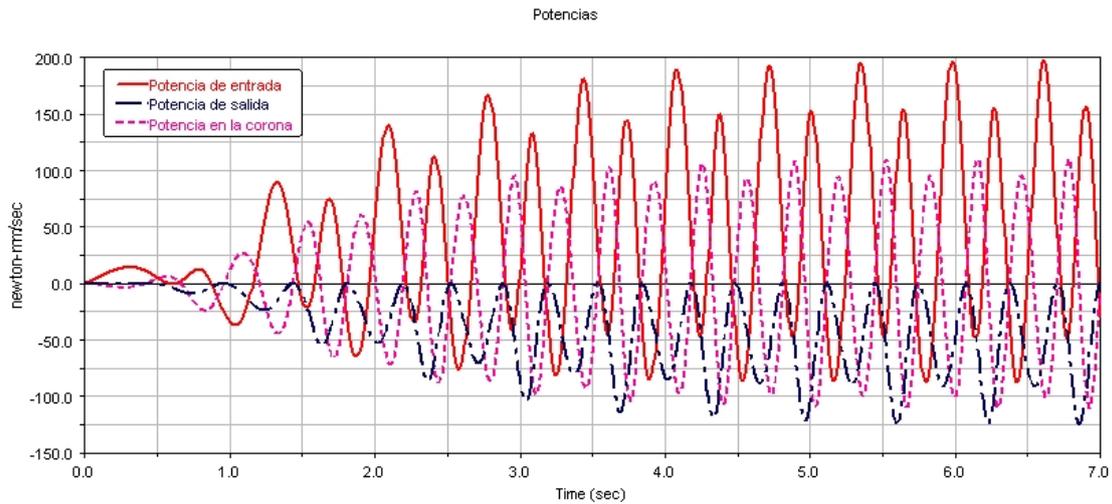


Figura 2.14: Potencias

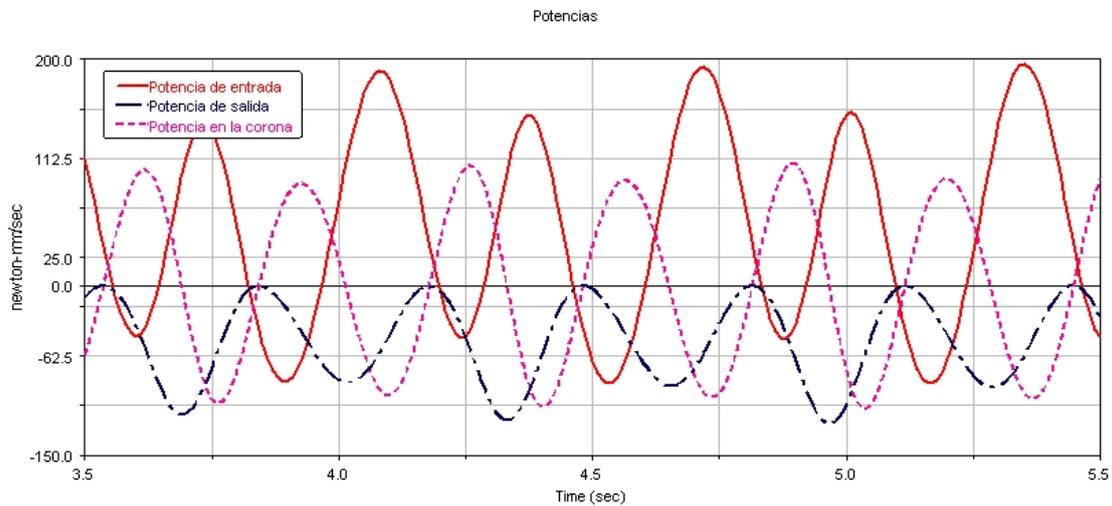


Figura 2.15: Potencias

Puede verse en las figuras 2.14 y 2.15 que el comportamiento es el esperado. La entrada es la que cede potencia al sistema, existiendo tramos en los que la absorbe, pero siendo el balance global de energía de cesión. La salida absorbe potencia del sistema en todo momento, y la corona absorbe y cede potencia siendo su balance final de energía cero. También se observan los tres estados por los que pasa el tren epicicoidal:

- La entrada cede potencia a la corona y a la salida.
- La corona cede potencia a la entrada y la salida.
- La entrada y la corona ceden potencia a la salida.

Una vez visto esto, se variarán algunos elementos del sistema, manteniendo el resto constantes, para ver su comportamiento.

a.-) Aumento de velocidad de entrada

Si se aumenta la velocidad de entrada, manteniendo el resto de variables constante se obtiene:

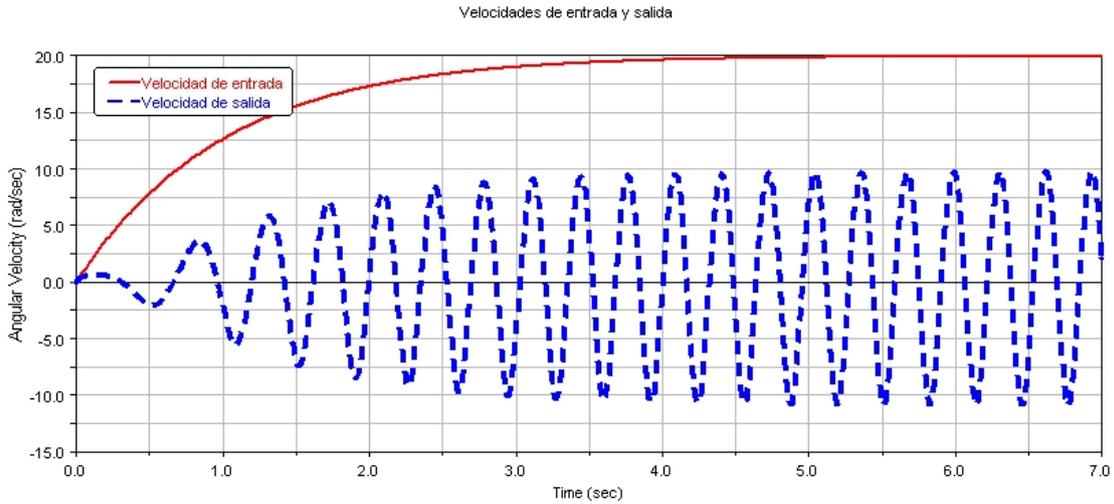


Figura 2.16: Velocidades de entrada y salida

Se puede ver en la figura 2.16 que aumentando la velocidad, la amplitud de la señal de salida aumenta en mayor proporción que la de entrada, lo que da una nueva evidencia de la no linealidad del sistema. Lo que sí aumenta en la misma proporción es la frecuencia de la señal.

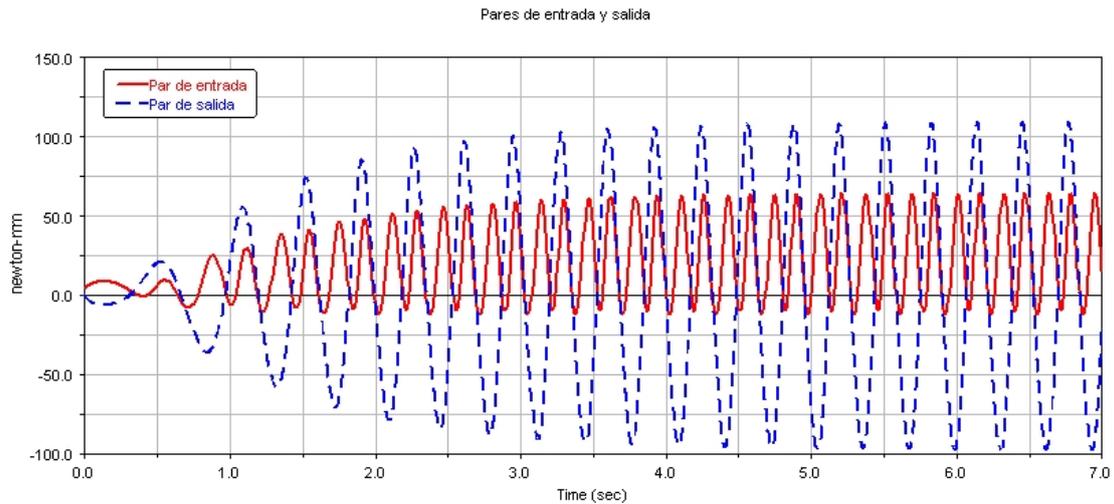


Figura 2.17: Par de entrada y salida

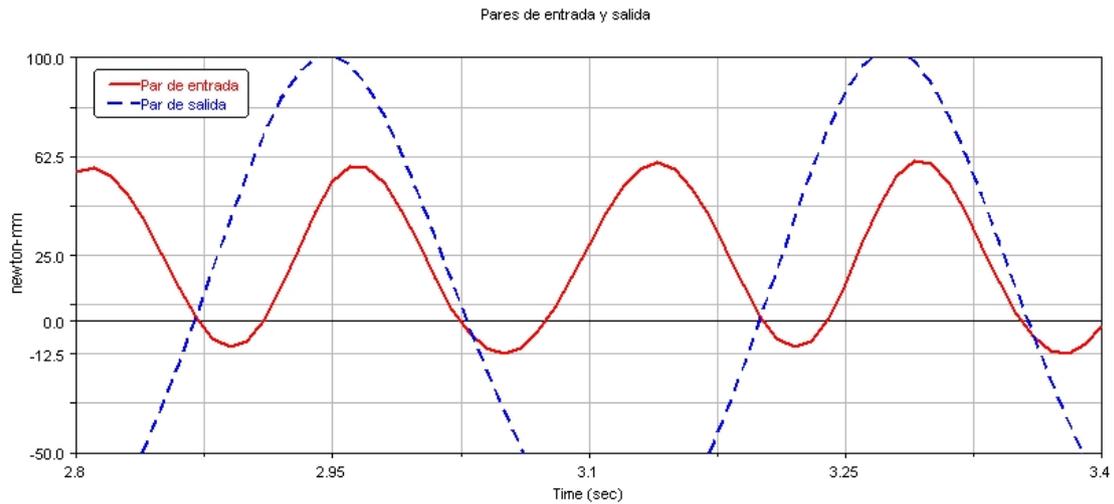


Figura 2.18: Par de entrada y salida

En las figuras 2.17 y 2.18 se ve que par de salida aumenta, debido a que, al aumentar la velocidad de entrada, se aumentan las aceleraciones de la corona, y el sistema se autorregula para encontrar un nuevo punto de equilibrio, haciendo que los esfuerzos en el planeta sean mayor, provocando que aumente la velocidad de salida, que, dado que el par de salida es proporcional a la velocidad, éste aumenta.

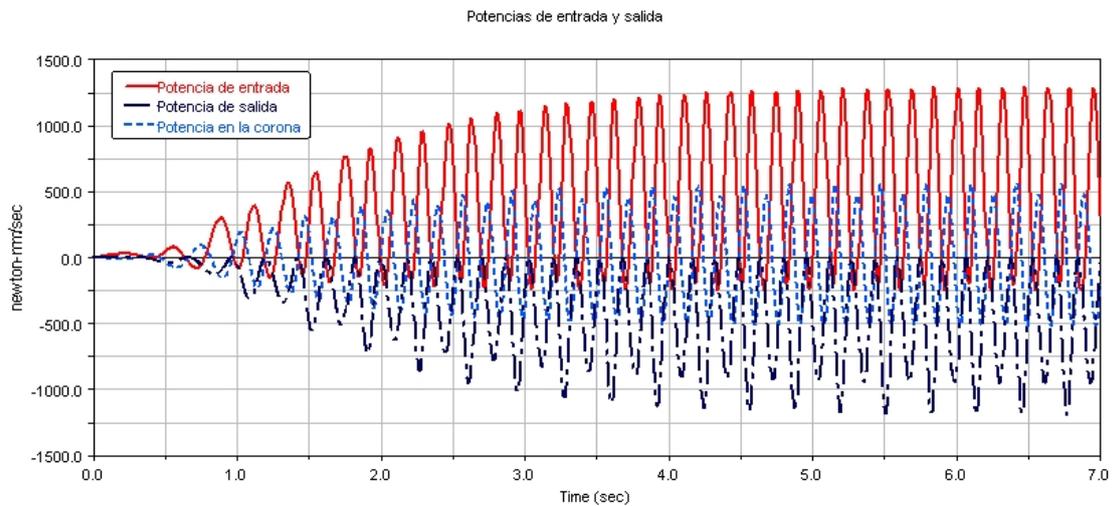


Figura 2.19: Potencias

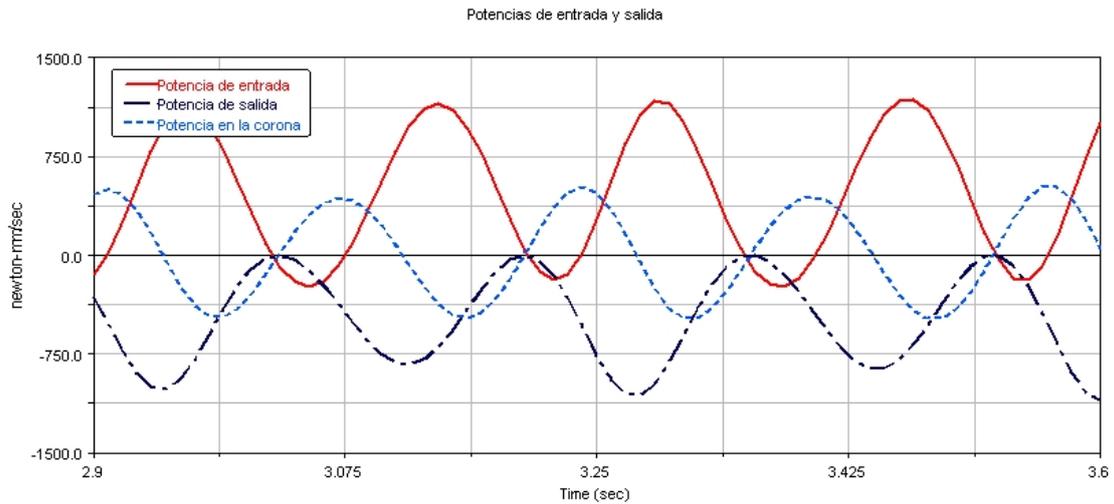


Figura 2.20: Potencias

En cuanto a la potencia, se ve en las figuras 2.19 y 2.20 que la puesta en juego por cada elemento es mucho mayor.

En resumen, al aumentar la velocidad de entrada lo que se consigue es aumentar el esfuerzo en el planeta, debido a las mayores aceleraciones y deceleraciones en la corona. Esto provoca un aumento de la velocidad (y del par) de salida, y con ello, aumentar las potencias puestas en juego con cada uno de los elementos, y que el par de entrada sea más regular.

b.-) Aumento de la inercia de la corona

Se aumenta la inercia de la corona mediante un incremento de la densidad del material con el que está construida. Manteniendo el resto de variables constantes de la primera simulación, los resultados obtenidos son:

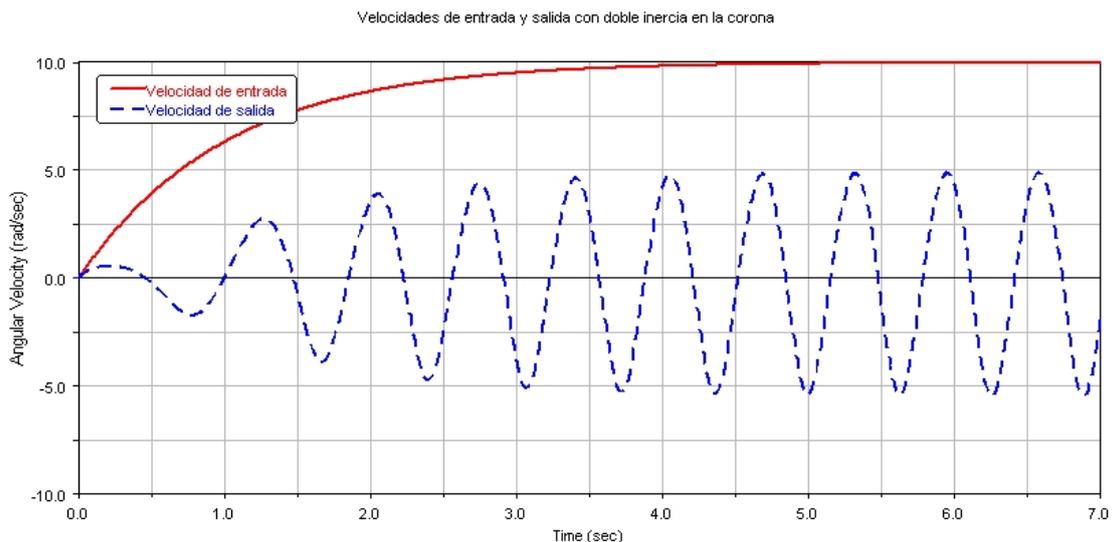


Figura 2.21: Velocidades de entrada y salida

Comparando la figura 2.21 con la 2.12 se observa que aumenta la amplitud de la señal de salida, quedándose la frecuencia de la misma constante. Se observa que al aumentar la inercia de la corona, aumentan los esfuerzos en el planeta, lo que hace que la velocidad de salida sea mayor.

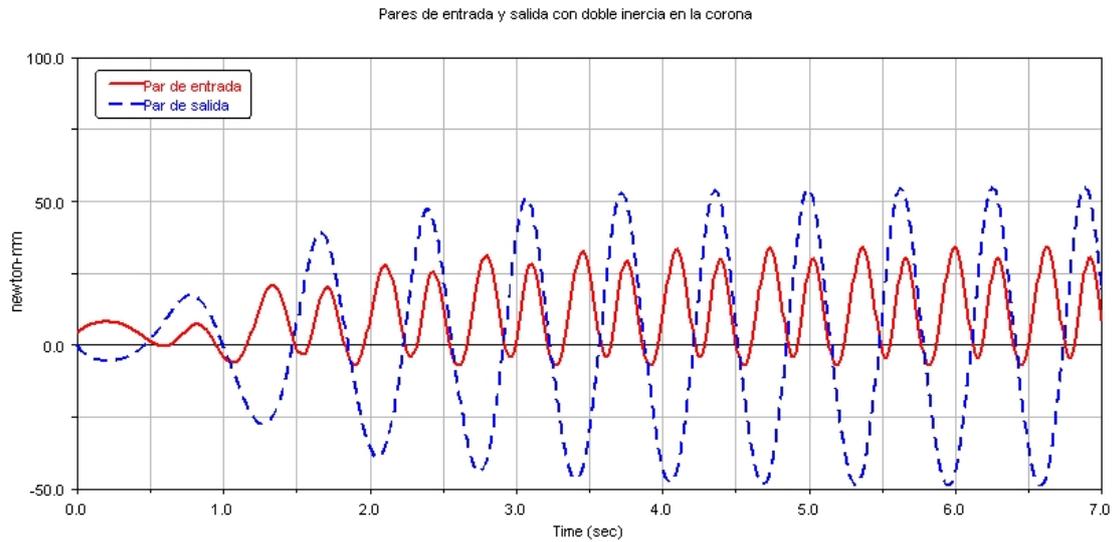


Figura 2.22: Par de entrada y salida

Comparando la figura 2.22 con la 2.13 puede verse que la amplitud de ambas señales se dobla aproximadamente, y que la señal del par de entrada es más regular.

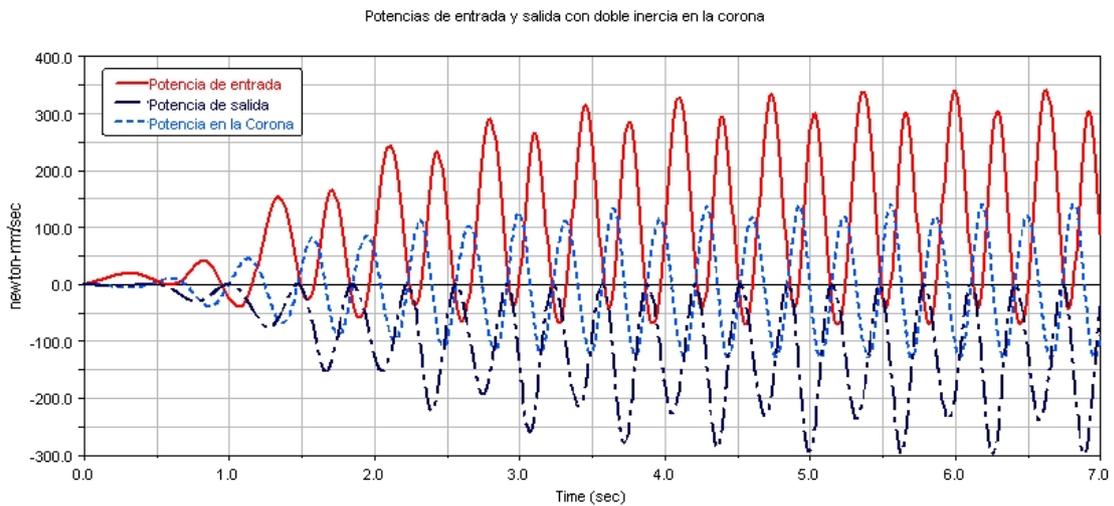


Figura 2.23: Potencias

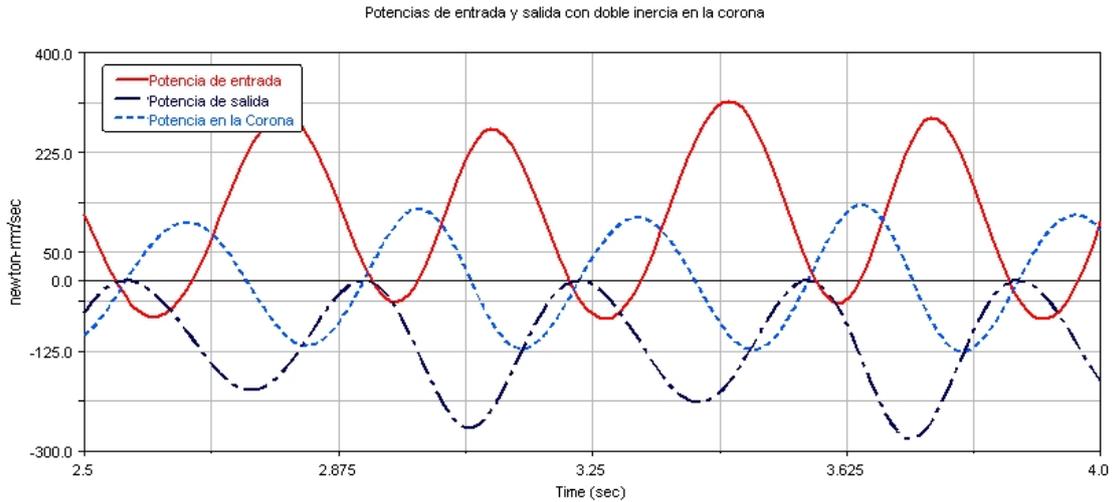


Figura 2.24: Potencias

Comparando las figuras 2.23 y 2.24 con las 2.14 y 2.15 se observa que las potencias puestas en juego tanto por la entrada como por la salida aumentan a casi el doble, en cambio, la potencia puesta en juego por la corona apenas aumenta.

Por lo tanto, al aumentar la inercia de la corona, aumentan las aceleraciones y deceleraciones de la corona, lo que provoca un aumento en los esfuerzos en el planeta. Como existe una relación directa entre el par y la velocidad de salida, al aumentar los esfuerzos aumenta la velocidad.

c.-) Aumento del par resistente a la salida

En este caso, se aumenta la constante del par de resistente en el planeta, manteniendo el resto de variables como al principio. Haciendo ésto, las velocidades quedan:

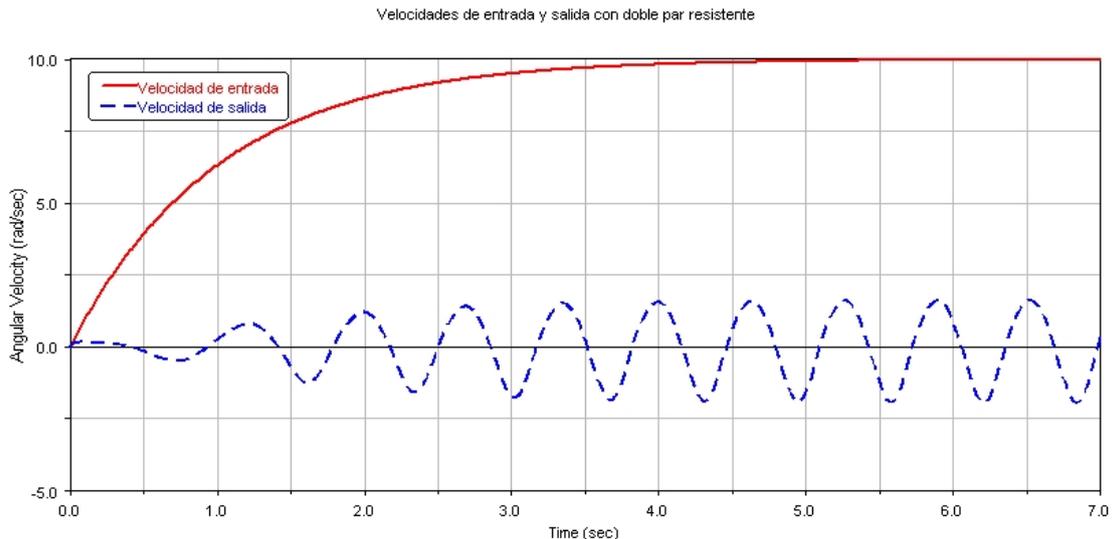


Figura 2.25: Velocidades de entrada y salida

Comparando las figuras 2.12 y 2.25, puede verse, que al aumentar la constante del par resistente, la velocidad de salida se reduce, ya que el sistema alcanza un nuevo

punto de equilibrio. Como no se ha modificado ni la velocidad de entrada ni la inercia de la corona, los esfuerzos en el planeta son los mismos, pero como el par resistente es mayor, se reduce la velocidad.

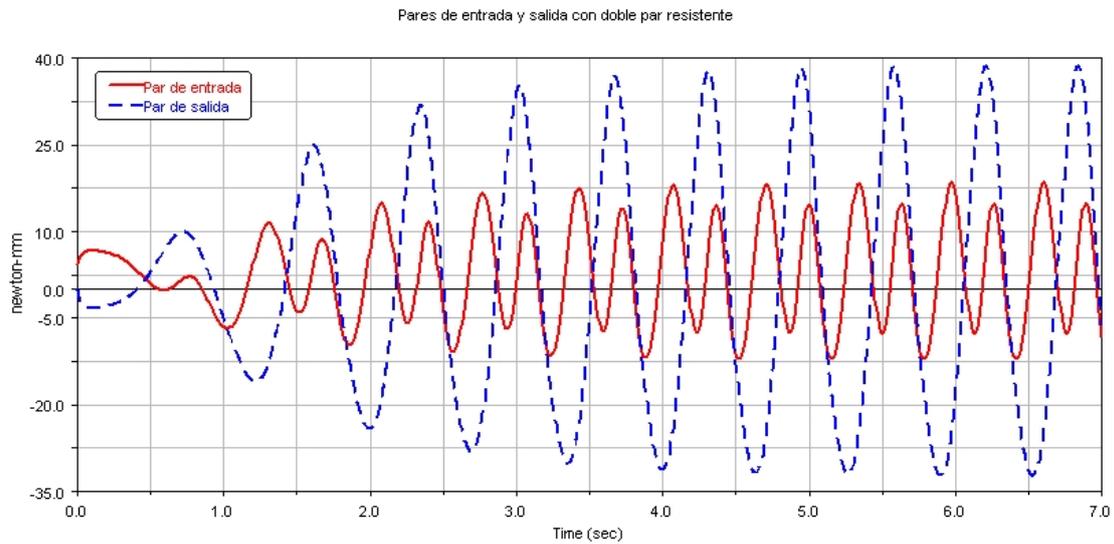


Figura 2.26: Par de entrada y salida

Comparando la figura 2.26 con la 2.13 se observa que los pares, permanecen prácticamente iguales, debido a que como el par de salida es función de la velocidad de salida, al aumentar la constante, la velocidad se ha reducido, con lo que el par apenas sufre variación.

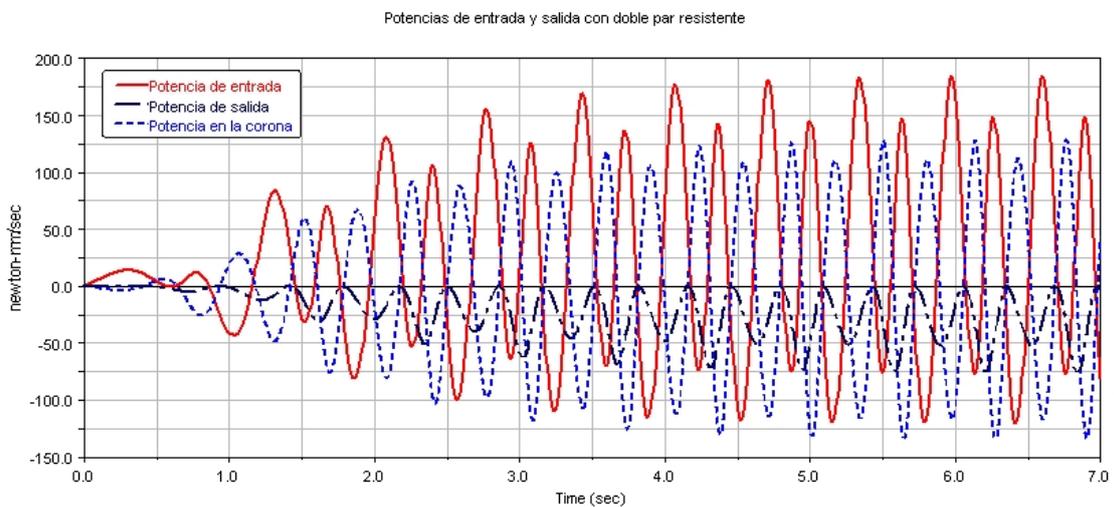


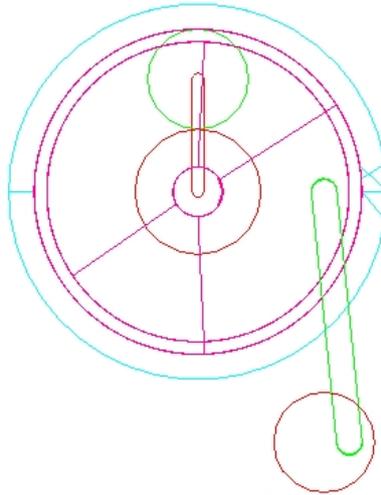
Figura 2.27: Potencias

En cuanto a las potencias puestas en juego, comparando la figura 2.27 con la 2.14, aumenta la de salida y la de la corona. En realidad el comportamiento de la potencia de salida frente al par resistente tiene forma de campana, cumpliéndose que al aumentar el par resistente, aumenta la potencia, aunque si se aumenta demasiado la potencia comienza a bajar hasta llegar a cero cuando la salida se bloquea.

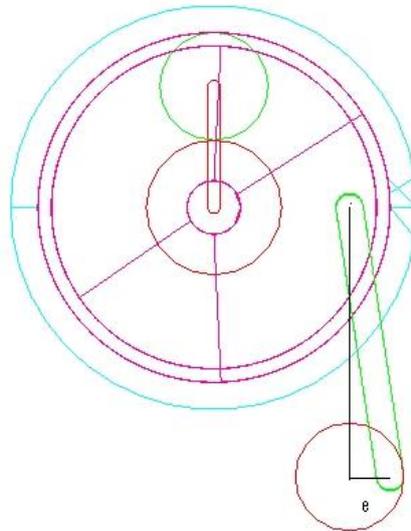
d.-) Aumento de la excentricidad de la manivela-balancín

El accionamiento es mediante un manivela balancín donde el centro del manivela coincide donde se conecta la biela al portasatélites. La conexión de la biela en la manivela se hace a una distancia del centro que es lo que se denomina excentricidad, que es lo que se varía en este apartado. En la figura 2.28 puede verse una imagen la simulación en ADAMs donde se aprecia lo que se ha llamado excentricidad.

Last_Run Time= 0.0000 Frame=1



Last_Run Time= 0.0000 Frame=1

**Figura 2.28: Manivela-Balancín**

Aumentando la excentricidad, manteniendo el resto de variables como al principio, se ve, en la figura 2.29, que la velocidad de salida queda:

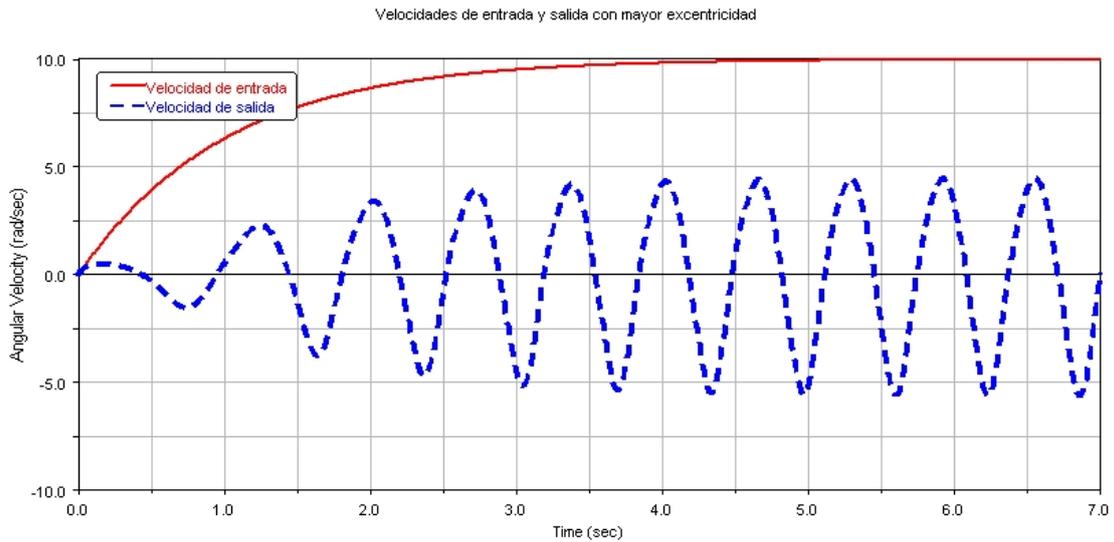


Figura 2.29: Velocidades de entrada y salida

Comparando las figuras 2.29 y 2.12, se ve que la señal de salida aumenta su amplitud. Esto se debe a que al aumentar la excentricidad, aumentan los esfuerzos en el planeta, haciendo que aumente la velocidad de salida. También se observa que la señal de salida deja de ser centrada, debido a que, como se explicó antes, la manivela-balancín no proporciona una señal senoidal exacta.

En cuanto a los pares transmitidos, se tiene que los pares transmitidos son mayores, comparando las figuras 2.28 y 2.13.

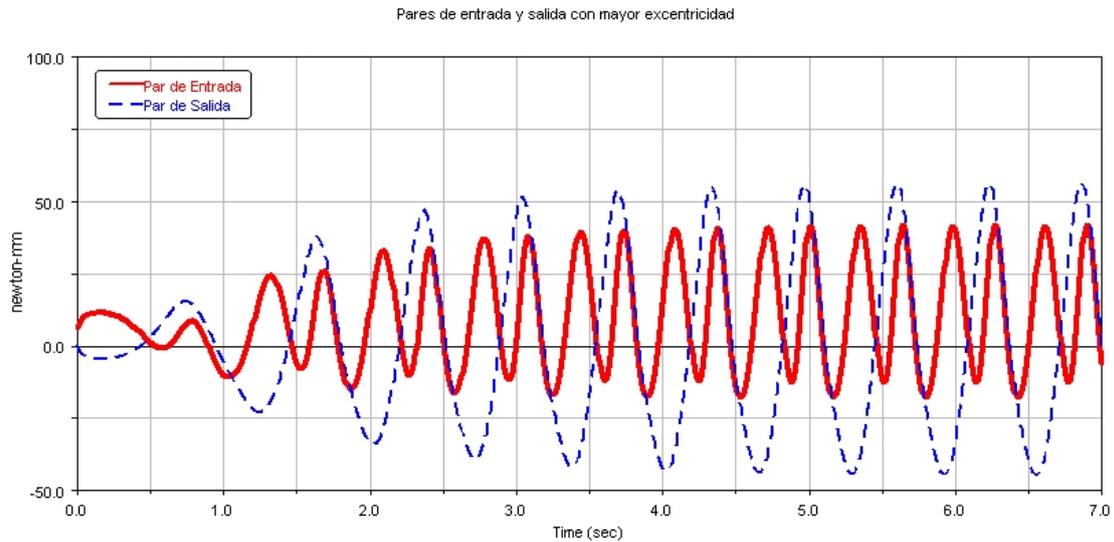


Figura 2.30: Par de entrada y salida

Para las potencias, se observa en las figuras 2.31 y 2.32 que la potencia puesta en juego es mayor que en las figuras 2.14 y 2.15 debido a que tanto los pares como las velocidades son mayores.

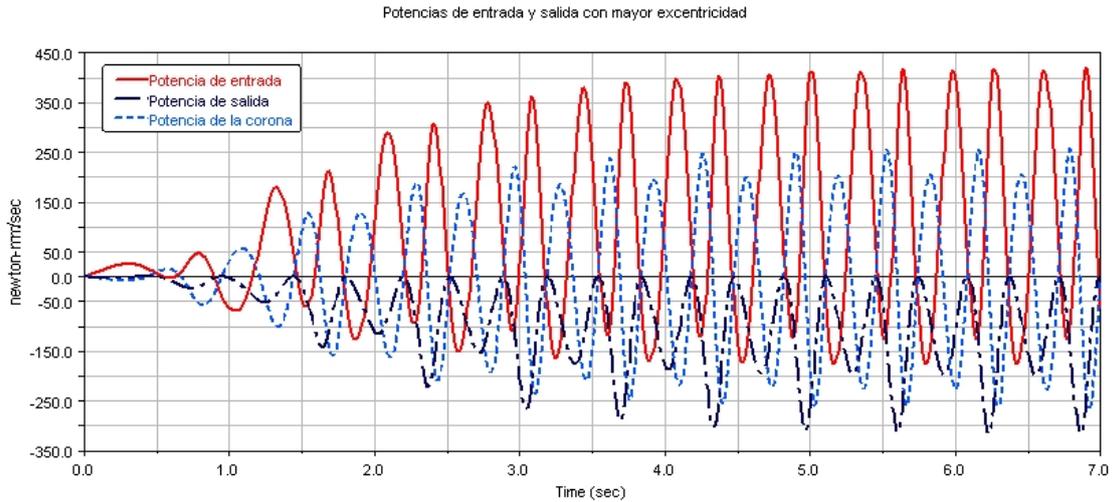


Figura 2.31: Potencias

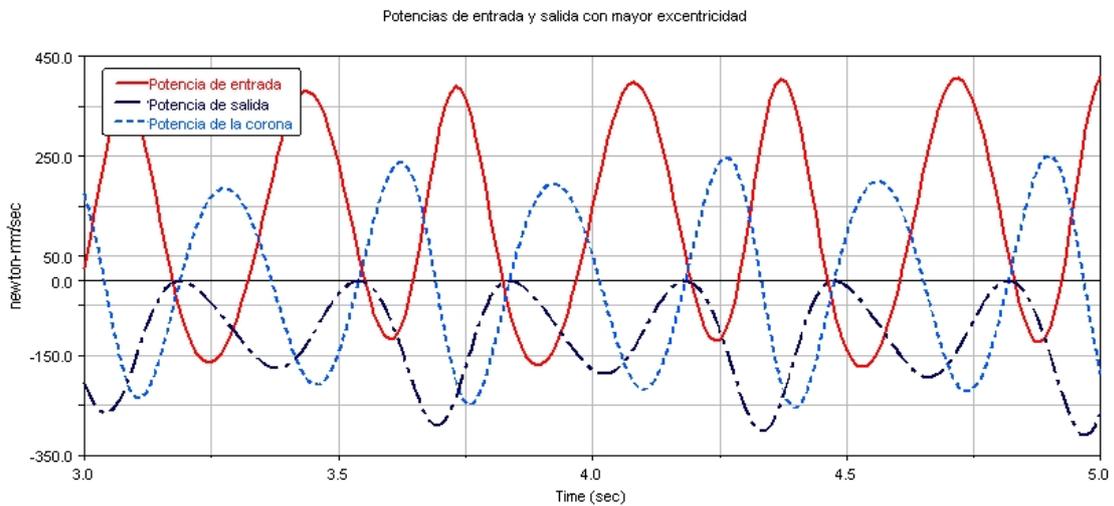


Figura 2.32: Potencias

En conclusión, al aumentar la excentricidad de la manivela balancín, se consigue aumentar la velocidad de salida, pero ésta se aleja más de una señal senoidal centrada en cero.

A continuación se comprobará como es el comportamiento del sistema si la entrada es un par constante en vez de una velocidad constante.

2.2.3.-) PAR DE ENTRADA CONSTANTE

Para esta simulación se introducirá un par constante de 5 Nmm en la manivela. El resto de condiciones se quedará igual, es decir, el par de salida será dependiente de la velocidad de salida, y todos los elementos del sistema serán los mismos.

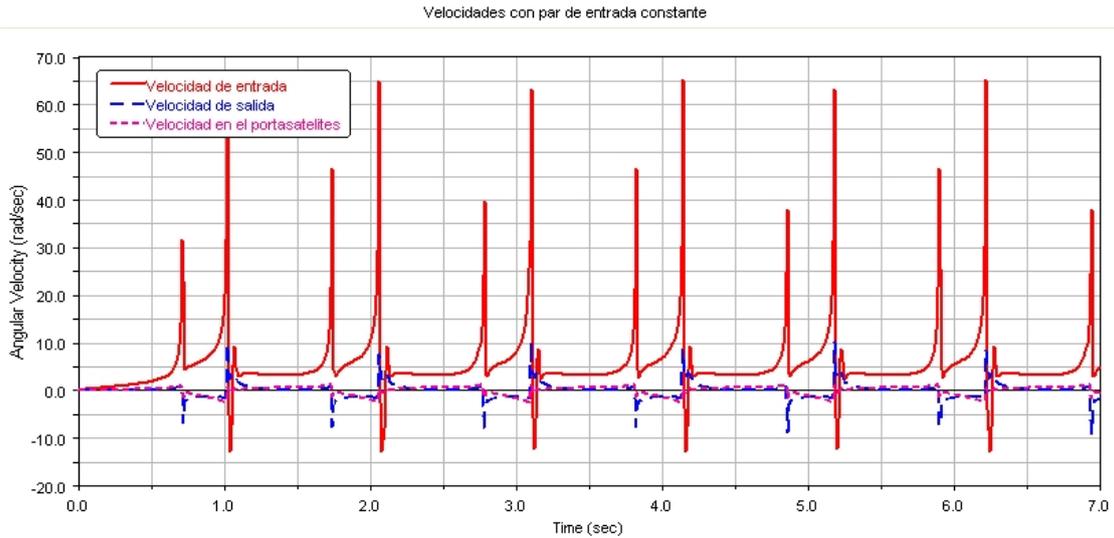


Figura 2.33: Velocidades de entrada y salida

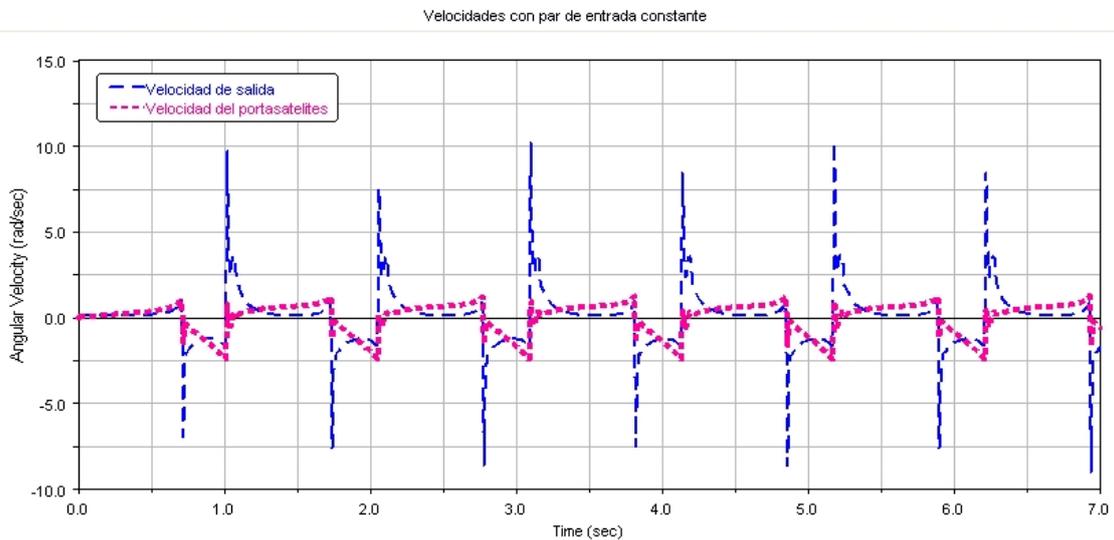


Figura 2.34: Velocidades de entrada y portasatélites

En las figuras 2.33 y 2.34 se observa que la señal de entrada varía mucho y muy rápidamente, llegando incluso a ser negativa, debido a la exigencia de que el par de entrada sea constante, por tanto, sería necesario un disco de inercia a la entrada para amortiguar los cambios de velocidad de entrada. En cuanto a las señales de salida y la del portasatélites, se ve que ambas son periódicas y de la forma que se ve en la figura 2.34.

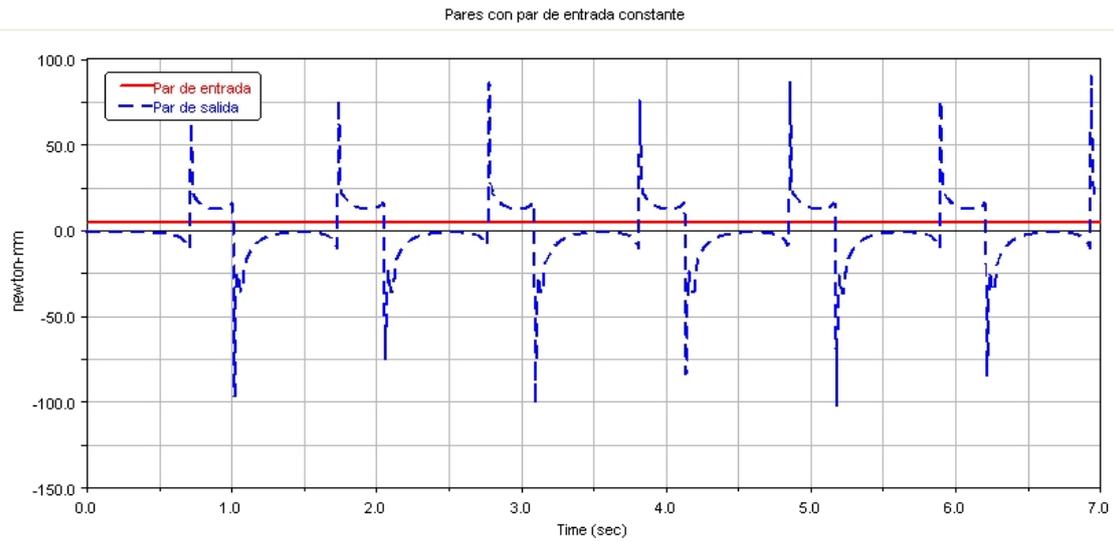


Figura 2.35: Par de entrada y salida

En los pares, como puede verse la figura 2.35, se obtiene que el de entrada es constante, como se ha introducido, y el de salida es proporcional a la velocidad angular. Puede verse que existen grandes picos de par.

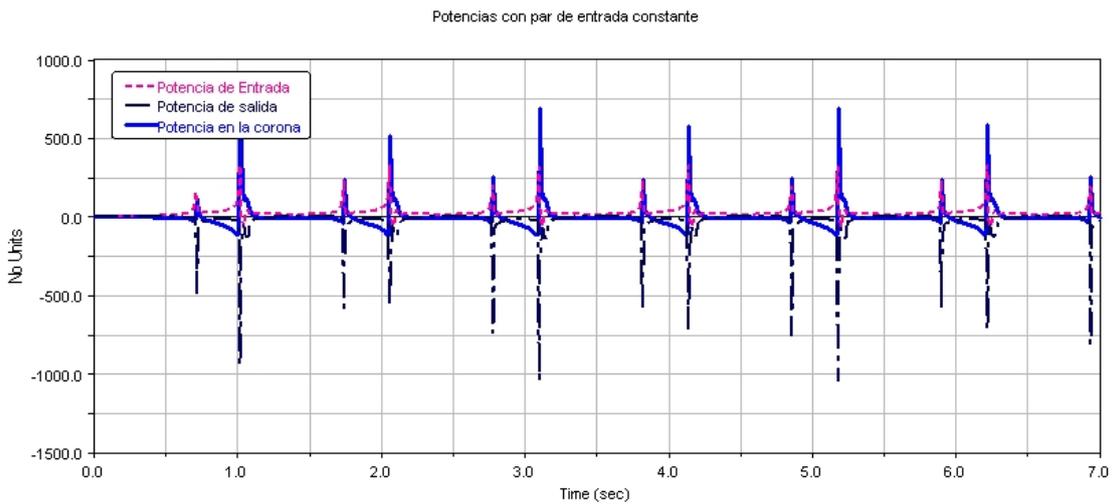


Figura 2.36: Potencias

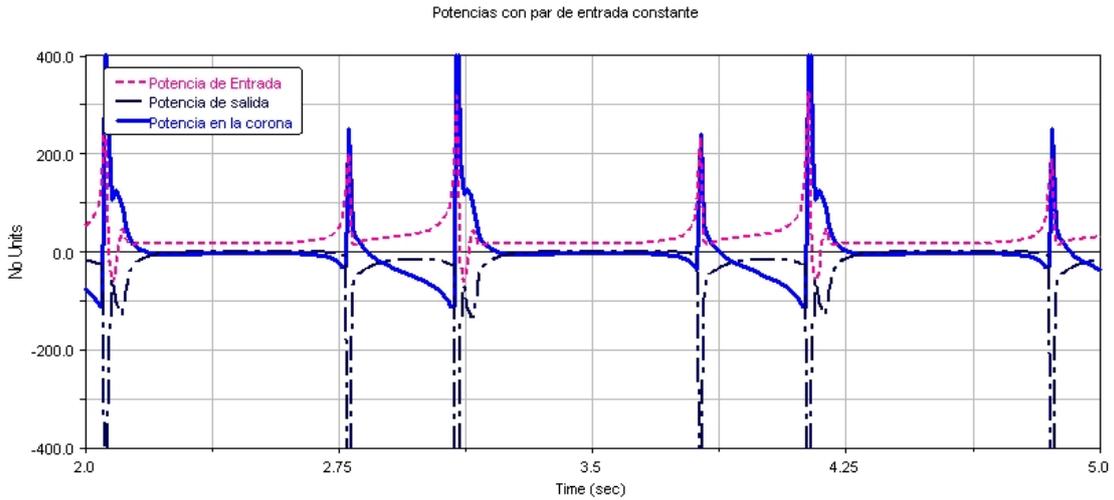


Figura 2.37: Potencias

En cuanto a la potencia, se observa en las figuras 2.36 y 2.37 que, en cada ciclo, como en el caso anterior, la salida siempre absorbe potencia, la entrada casi siempre cede potencia, aunque tiene algún tramo en el que también la consume, y la corona absorbe y cede potencia, siendo su balance final de energía consumida cero.

2.2.4.-) CONCLUSIONES

El accionamiento mediante manivela-balancín con velocidad de giro de entrada constante hace que, para excentricidades pequeñas, el comportamiento sea muy parecido al del tren epicicloidal accionado por una señal senoidal centrada, con las ventajas que ello conlleva, es decir, señales de velocidad y par más regulares. En cambio, si el accionamiento es mediante un par constante, se producen picos de par lo que hace necesario un disco de inercia que amortigüe las velocidades. En la figura 2.34 puede verse las velocidades cuando existe un disco de inercia. Los picos en la velocidad de entrada van disminuyendo, y ya siempre es positiva.

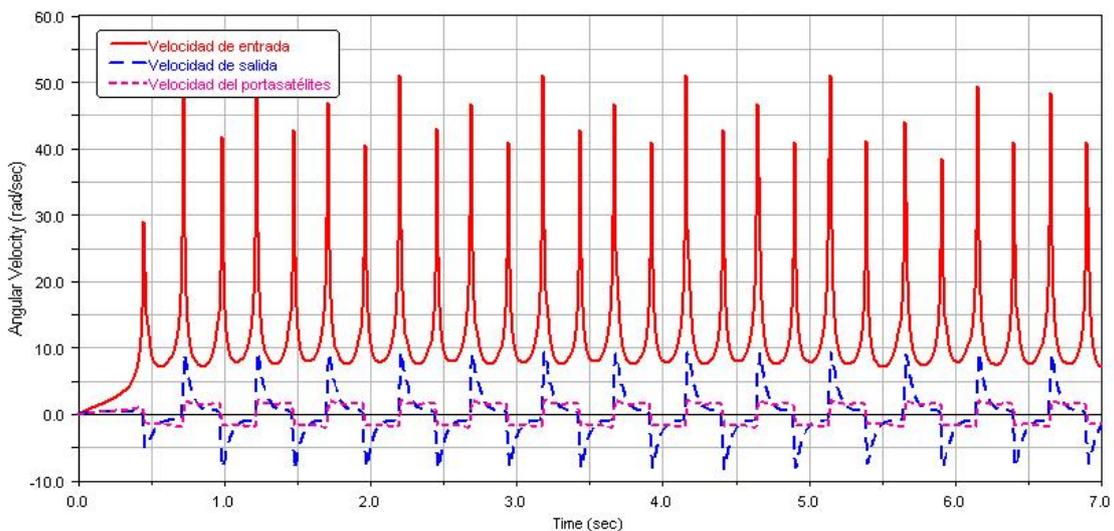


Figura 2.38: Velocidades con disco de inercia