

Proyecto fin de grado  
Ingeniería de tecnologías industriales

Proceso de verificación y calibración de un banco  
eléctrico de ensayo de transmisiones

Autor: Javier Camacho Moro

Tutores: Francisco José Morales Sánchez

Francisco García Benítez

**Dep. de ingeniería y ciencia de los materiales y del transporte**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





Proyecto fin de grado  
Ingeniería de tecnologías industriales

# **Proceso de verificación y calibración de un banco eléctrico de ensayo de transmisiones**

Autor:

Javier Camacho Moro

Tutores:

Francisco José Morales Sánchez

Doctor Ingeniero Industrial

Francisco García Benítez

Catedrático

Dep. de ingeniería y ciencia de los materiales y del transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Grado: Proceso de verificación y calibración de un banco eléctrico de ensayo de transmisiones

Autor: Javier Camacho Moro

Tutor: Francisco José Morales Sánchez  
Francisco García Benítez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, dar las gracias a mi familia que me ha apoyado cuando la carrera se complicaba y quieres tirar la toalla. Y, sobre todo, por la ayuda y consejos cuando la salud no acompañaba.

A mis tutores, Francisco y Fran, por darme la oportunidad de realizar este proyecto sobre un tema que me interesa mucho. Y a Antonio por ayudarme en el taller y enseñarme como se hacen realmente las cosas en el laboratorio.

Y finalmente a los compañeros que me han acompañado en algún momento de estos años. Tras tantas horas de clase y trabajos en grupo, sin ellos sería imposible haber alcanzado este momento.

*Javier Camacho Moro*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

Este trabajo de fin de grado tiene como objetivo el ensayo de cajas de cambios CVT o de relación de transmisión continuamente variable.

Estos ensayos se van a realizar en el laboratorio de automóviles en los bancos de ensayos de los que allí se disponen. Como en casi cualquier ensayo real, los resultados obtenidos diferirán de los resultados teóricos, por lo que otra tarea asociada a este trabajo serán discernir entre los errores asumibles fruto del propio método de ensayo o si hay algún error que se debe subsanar. En ambos casos hay que determinar la causa de estos errores para poder clasificarlos y, si es posible, solucionarlos.

Otro punto importante que se tendrá en cuenta en este trabajo y que en muchas ocasiones puede pasarse por alto o sin darle la relevancia adecuada es el montaje y ajuste de todos los elementos. Cuando se trata de ensayos se suele centrar la atención en los métodos de ensayo y en los resultados obtenidos, pero de nada sirven ambos si el montaje no es el adecuado. Además, conforme se avanza en el estudio surge la necesidad de hacer modificaciones en el montaje que también deben quedar reflejadas.



# Abstract

---

This end-of-grade project aims to test CVT gearboxes or continuously variable transmission ratio.

These tests will be carried out in the vehicle laboratories in the test benches that are available there. As in almost any real test, the results obtained will differ from the theoretical results, so another task associated with this work will be to discern between the assumable errors resulting from the test method itself or if there is an error that must be corrected. In both cases, the cause of these errors must be determined in order to classify them and, if possible, solve them.

Another important point that will be taken into account in this work and that in many occasions can be overlooked or without giving it the appropriate relevance is the assembly and adjustment of all the elements. When it comes to essays, the focus is usually on the test methods and the results obtained, but both are not useful if the assembly is not adequate. In addition, as the study progresses, there is a need to make changes in the assembly that must also be reflected.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>9</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>Abstract</b>	<b>13</b>
<b>Índice</b>	<b>14</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>16</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Descripción de los elementos que componen el banco de ensayos</b>	<b>2</b>
2.1 <i>Elementos mecánicos</i>	2
2.2 <i>Elementos electrónicos e informáticos</i>	12
<b>3 Calibración de los medidores de par</b>	<b>15</b>
3.1 <i>Primer montaje</i>	15
3.2 <i>Opciones de calibración</i>	15
3.3 <i>Primeras pruebas y errores detectados</i>	16
3.4 <i>Desmontajes en busca de información</i>	17
3.4.1 <i>Comprobación del apriete de los tornillos y desmontaje de la carcasa</i>	17
3.4.2 <i>Reparaciones</i>	19
3.4.3 <i>Comprobación de tornillos y desmontaje de la junta y la brida</i>	23
3.5 <i>Continuación de la investigación de los errores detectados</i>	24
3.6 <i>Hipótesis finales y correcciones</i>	24
3.7 <i>Primeras conclusiones</i>	26
3.8 <i>Ensayos programados</i>	26
3.8.1 <i>Ensayos sin carga de freno</i>	26
3.8.2 <i>Ensayo con carga de freno</i>	36
<b>4 Caja de cambios CVT inercial</b>	<b>39</b>
4.1 <i>Descripción de la caja de cambios y su funcionamiento</i>	39
4.2 <i>Segundo montaje. Instalación de la caja de cambios</i>	45
4.3 <i>Problema detectado en las primeras pruebas</i>	46
4.4 <i>Ensayos de la caja de cambios</i>	47
4.4.1 <i>Ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones</i>	49
4.4.2 <i>Ensayos bloqueando en primer tren de engranajes del rectificador</i>	61
4.4.3 <i>Ensayos bloqueando el segundo tren de engranajes</i>	64
<b>5 Últimos ensayos con la junta y conclusiones finales</b>	<b>71</b>
5.1 <i>Montaje de la nueva configuración del banco de ensayos</i>	71
5.2 <i>Procedimiento de ensayos</i>	71

5.3	<i>Ensayos con el freno inactivo</i>	72
5.4	<i>Conclusiones de los ensayos con el freno inactivo</i>	73
5.5	<i>Ensayos con el freno activo</i>	74
5.6	<i>Conclusiones de los ensayos con el freno activo</i>	75
<b>Referencias</b>		<b>76</b>
<b>Anexos</b>		<b>77</b>
A.	<i>Segundo montaje. Instalación de la caja de cambios</i>	77
B.	<i>Montaje, diseño y fabricación del mecanismo que supone la modificación del rectificador</i>	83
C.	<i>Montaje de la nueva modificación</i>	86
D.	<i>Reparaciones</i>	88
E.	<i>Montaje de la nueva configuración del banco de ensayos</i>	89

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Banco de ensayos.	2
Figura 2-2. Motor.	3
Figura 2-3. Placa de características del motor.	3
Figura 2-4. Motor eléctrico y ventilador que refrigeran al motor.	4
Figura 2-5. Placa del motor eléctrico que mueve el ventilador del motor.	4
Figura 2-6. Medidor de torque del motor.	5
Figura 2-7. Placa de características del medidor de torque del motor.	5
Figura 2-8. Medidor de torque del freno.	6
Figura 2-9. Placa de características del medidor de torque del freno.	7
Figura 2-10. Reductor de ejes paralelos.	8
Figura 2-11. Placa de características del reductor.	8
Figura 2-12. Bomba y mando de activo/inactivo del sistema de refrigeración del reductor.	9
Figura 2-13. Radiador del sistema de refrigeración.	9
Figura 2-14. Freno.	10
Figura 2-15. Placa de características del freno.	10
Figura 2-16. Motor eléctrico y ventilador que refrigeran al freno.	11
Figura 2-17. Placa del motor eléctrico que mueve el ventilador del freno.	11
Figura 2-18. Chasis del banco en color azul con patas regulables.	12
Figura 2-19. Cables protegidos contra las interferencias electromagnéticas.	12
Figura 2-20. Configuración de las alarmas a través del software del banco de ensayos.	13
Figura 3-1. Montaje de la junta cardán, primer elemento de ensayo.	15
Figura 3-2. Comparación de velocidades recogidas por los dos medidores de par.	16
Figura 3-3. Comparación de pares recogidos por los dos medidores de par.	17
Figura 3-4. Operación de corte y retirada de la carcasa.	18
Figura 3-5. Tapón de nivel de aceite vacío del reductor.	19
Figura 3-6. Tapón de nivel de aceite lleno del reductor.	20
Figura 3-7. Grietas en la soldadura del lateral izquierdo.	21
Figura 3-8. Nueva soldadura del lateral izquierdo.	21
Figura 3-9. Grietas en la soldadura del lateral derecho.	22
Figura 3-10. Nueva soldadura del lateral derecho.	22
Figura 3-11. Tornillos y arandelas que unen la junta a la brida.	23
Figura 3-12. Banco de ensayos sin la junta.	23
Figura 3-13. Medidor de torque del motor abierto.	25
Figura 3-14. Medidor de torque del freno abierto.	25
Figura 3-15. Representación de la entrada programada para el motor.	26

Figura 3-16. Registro de velocidades del primer ensayo.	27
Figura 3-17. Ampliación de la figura 3-16 en la zona final correspondiente a velocidad nula.	27
Figura 3-18. Registro de velocidades del segundo ensayo.	28
Figura 3-19. Registro de velocidades del tercer ensayo.	29
Figura 3-20. Verificación de los resultados del primer ensayo en régimen permanente.	29
Figura 3-21. Verificación de los resultados del segundo ensayo en régimen permanente.	30
Figura 3-22. Verificación de los resultados del tercer ensayo en régimen permanente.	30
Figura 3-23. Registro de velocidades de los tres ensayos.	31
Figura 3-24. Ampliación de la figura 3-23 en la zona inicial correspondiente a velocidad nula.	31
Figura 3-25. Ampliación de la figura 3-23 en la zona final correspondiente a velocidad nula.	32
Figura 3-26. Registro de los pares en el primer ensayo.	33
Figura 3-27. Ampliación de la figura 3-26 en la zona final correspondiente a velocidad nula.	33
Figura 3-28. Registro de velocidades y pares del primer ensayo.	34
Figura 3-29. Registro de los pares en el segundo ensayo.	35
Figura 3-30. Registro de los pares en el tercer ensayo.	35
Figura 3-31. Registro de pares de los tres ensayos.	36
Figura 3-32. Representación de la entrada programada para el motor y el freno.	37
Figura 3-33. Registro de velocidades en el ensayo con carga de freno.	37
Figura 3-34. Verificación de los datos de velocidades en régimen permanente del ensayo con carga de freno.	38
Figura 3-35. Registro de los pares en el ensayo con carga de freno.	38
Figura 4-1. Esquema de la CVT. Imagen obtenida de la fuente [3], figura 2-1 en la página 3.	39
Figura 4-2. Imagen de la CVT con sus partes indicadas.	40
Figura 4-3. Mecanismo de 4 barras.	40
Figura 4-4. Mecanismo de 4 barras conectado a la brida de entrada.	41
Figura 4-5. Esquema del funcionamiento del mecanismo de 4 barras.	41
Figura 4-6. Mecanismo inercial.	42
Figura 4-7. Mecanismo inercial en su parte posterior.	42
Figura 4-8. Rectificador desde perspectivas diferentes.	43
Figura 4-9. Esquema del funcionamiento del rectificador. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-38 en la página 86.	44
Figura 4-10. Funcionamiento interno de las ruedas libres. Imagen obtenida de la fuente [3], figura 2-6 en la página 7.	44
Figura 4-11. Esquema del efecto del rectificador.	45
Figura 4-12. Caja de cambios instalada.	45
Figura 4-13. Jaula de seguridad y caja de cambios instaladas.	46
Figura 4-14. Tornillos sin el apriete adecuado.	46
Figura 4-15. Esquema de la primera modificación. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-38 en la página 86.	47
Figura 4-16. Comportamiento con la primera modificación.	48
Figura 4-17. Esquema de la segunda modificación. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-38 en la página	

86.	48
Figura 4-18. Comportamiento con la segunda modificación.	48
Figura 4-19. Entrada programada para el motor.	49
Figura 4-20. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el primer ensayo.	50
Figura 4-21. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el segundo ensayo.	51
Figura 4-22. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el tercer ensayo.	51
Figura 4-23. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el cuarto ensayo.	52
Figura 4-24. Velocidad de motor durante la serie de ensayos.	54
Figura 4-25. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos.	54
Figura 4-26. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en los primeros cuatro ensayos.	55
Figura 4-27. Ensayo prolongado de la caja de camnios.	56
Figura 4-28. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el primer ensayo con freno.	56
Figura 4-29. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el segundo ensayo con freno.	57
Figura 4-30. Ampliación de la zona central de la velocida de salida del segundo ensayo con freno.	57
Figura 4-31. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el tercer ensayo con freno.	58
Figura 4-32. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el cuarto ensayo con freno.	59
Figura 4-33. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos con freno.	59
Figura 4-34. Ampliación de la zona central de la velocida de salida de la comparativa de ensayos con freno.	60
Figura 4-35. Reductora con el mecanismo de bloqueo instalado.	61
Figura 4-36. Comparativa de velocidades a la entrada de la caja de cambios en la serie de ensayos.	62
Figura 4-37. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos.	62
Figura 4-38. Comparación de velocidades en ensayos con y sin modificación de la reductora.	63
Figura 4-39. Rectificador con el segundo tren de engranajes bloqueado.	64
Figura 4-40. Velocidades de entrada de la caja de cambios con el segundo tren de engranajes fijado.	65
Figura 4-41. Velocidades de salida de la caja de cambios con el segundo tren de engranajes fijado.	65
Figura 4-42. Velocidades de entrada de la caja de cambios tras las reparaciones en el rectificador.	66
Figura 4-43. Velocidades de salida de la caja de cambios tras las reparaciones en el rectificador.	66
Figura 4-44. Comparación de velocidades en ensayos con y sin modificación de la reductora.	67
Figura 4-45. Comparación de velocidades en ensayos con la primera y la segunda modificación de la reductora.	67
Figura 4-46. Comparativa de velocidades a la entrada de la caja de cambios en la serie de ensayos.	68
Figura 4-47. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos.	69
Figura 4-48. Ampliación de la zona central de las velocidades de salida de la figura 3-50.	69
Figura 4-49. Comparación de velocidades en ensayos con la primera y la segunda modificación de la reductora con el freno activo.	70
Figura 5-1. Curva programada para la velocidad del motor.	71
Figura 5-2. Velocidades del motor en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.	72
Figura 5-3. Velocidades del freno en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.	72

Figura 5-4. Momentos del motor en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.	73
Figura 5-5. Momentos del freno en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.	73
Figura 5-6. Comparativa de velocidades del motor con el motor inactivo y activo.	74
Figura 5-7. Comparativa de momentos del motor con el motor inactivo y activo.	75
Figura A-1. Situación de los puntos de anclajes, esligas y ganchos.	77
Figura A-2. Banco de ensayos inclinado durante el movimiento a su nueva posición.	78
Figura A-3. Comprobando la alineación de la caja de cambios.	80
Figura A-4. Comprobando la alineación de la caja de cambios a su salida y las vigas bajo ésta.	80
Figura A-5. Nuevo punto de unión entre la jaula de protección y la viga bajo la caja de cambios.	81
Figura A-6. Apertura realizada en la jaula para la entrada a la caja de cambios.	81
Figura A-7. Apertura realizada en la jaula para salida de la caja de cambios.	82
Figura A-8. Jaula de seguridad instalada.	82
Figura E-1. Efecto de las vibraciones sobre los pasadores y la brida de entrada de la caja de cambios.	90
Figura E-2. Efecto de las vibraciones sobre el eje de entrada de la caja de cambios.	90



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El objetivo principal del proyecto es ensayar una caja de cambios CVT o de relación de transmisión continuamente variable. En este tipo de caja de cambios se tienen infinitas relaciones de transmisión, al contrario de lo que ocurre en las cajas de cambios manuales o automáticas en las que se tiene un número fijo de relaciones de transmisión. Estas cajas de cambios tienen la ventaja de tener siempre la relación adecuada para que el motor se encuentre en su punto óptimo de rendimiento en cada momento. Pero también cuentan con la limitación de que aún no soportan potencias muy elevadas.

Concretamente se van a realizar pruebas a una caja de cambios diseñada por el propio departamento. [1][2] Se trata de una CVT de tipo dinámico inercial. En las CVT dinámicas, la relación de transmisión depende de dos factores: un elemento de regulación, sobre el que puede actuarse para definir la relación que más interese en cada momento, y los factores externos a la caja de cambios, como pueden ser la velocidad del motor o el par resistente que tiene que vencer. En este prototipo hay un elemento inercial que realiza las funciones de convertidor de par.

A esta caja de cambios se le van a realizar pruebas en un banco de ensayos con un motor eléctrico que se describe en el capítulo dos. Antes de comenzar con las pruebas es necesario llevar a cabo una calibración del mismo ya que no se conocen los errores asociados a él. Este paso es indispensable y se detalla en el capítulo tres, ya que las pruebas se van a realizar concretamente en este banco de ensayos. Si se realizaran en un banco de ensayos cuyos errores fueran conocidos bastaría con incluirlos en el análisis de los resultados y pasar directamente a realizar las pruebas. Pero no es éste el caso.

Una vez realizada la calibración se pasa al objetivo principal del proyecto, ensayar la caja de cambios. Durante el capítulo cuatro se describen los elementos que componen el prototipo que se va a ensayar, el procedimiento para realizar los ensayos y los resultados y conclusiones de los mismos. Los ensayos van principalmente enfocados a comparar el comportamiento de la caja de cambios en dos situaciones, la primera de ellas es ensayar la caja de cambios con el diseño realizado por el departamento sin ninguna modificación, mientras que la segunda situación es realizar ensayos añadiendo unas modificaciones a la caja de cambios. Durante el capítulo cuatro se explicará con mucho más detalle en que consisten estas dos situaciones.

Finalmente, en el quinto capítulo se realizarán unos ensayos adicionales sin la caja de cambios para corroborar algunas de las hipótesis que se han realizado sobre el comportamiento del banco de ensayos. Con estos ensayos y las conclusiones que se obtengan de ellos, se habrá caracterizado completamente el banco de ensayos de forma que se podrán realizar más pruebas en el futuro, tanto del prototipo objeto de estudio como de otras cajas de cambios CVT, conociendo de antemano el comportamiento del banco de ensayos.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONENTEN EL BANCO DE ENSAYOS

### 2.1 Elementos mecánicos

En primer lugar, se va a describir brevemente el banco de ensayos utilizado, que puede verse de forma general en la figura 2-1. Éste está compuesto por varios elementos que se enumeran y se caracterizan a continuación:

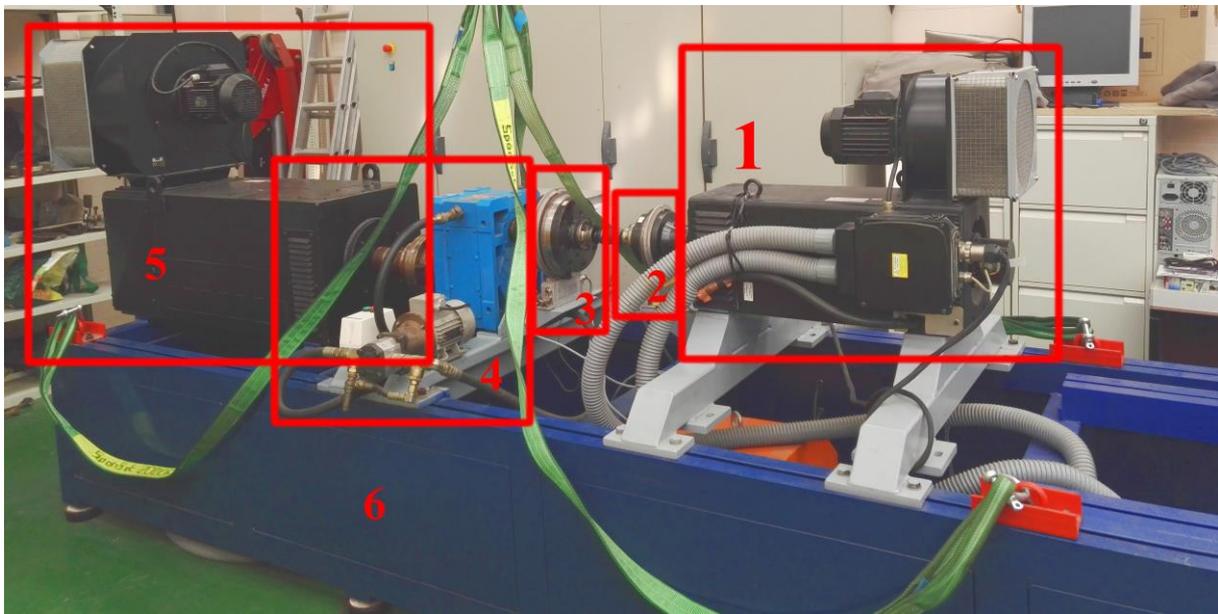


Figura 2-1. Banco de ensayos.

1. Motor eléctrico de gran potencia que a su vez tiene asociado un motor eléctrico de mucha menor envergadura encargado de mover el ventilador que refrigera el motor de gran potencia. De aquí en adelante, salvo que se incluya una aclaración indicando lo contrario, cuando se cite al motor en realidad se hará referencia al motor eléctrico de gran potencia. Los motores se muestran en las figuras 2-2 y 2-4, mientras que las características de cada uno de ellos vienen reflejadas en las placas de las figuras 2-3 y 2-5.



Figura 2-2. Motor.

		<b>TETRAVEC</b>		CO.M.E.R. S.r.L. Via Uroboni, 27/28 27029 - VIGEVANO (PV)		
Type 160L . 4	s/n 428A/05	YearMAG 2005	IP 23	Ins. cl. F		
V nom. 400	r.p.m. nom. 3480	Hz max 217	r.p.m. max 6500			
Duty S1	Nm 425.6	Kw 155	A 283	Hz 117	Cos $\phi$ 0.85	
Duty S	Nm	Kw	A	Hz	Cos $\phi$	
Vent. 230 V -	4.5 A - 50Hz	Brake V		Brake A		
Vent. 400 V -	2.6 A - 50Hz	Trasd. EH80C1024Z5L14X3MR.197+295				
Code						
<b>POWERTECH</b>			by CO.M.E.R. Vigevano - ITALY			

Figura 2-3. Placa de características del motor.



Figura 2-4. Motor eléctrico y ventilador que refrigeran al motor.

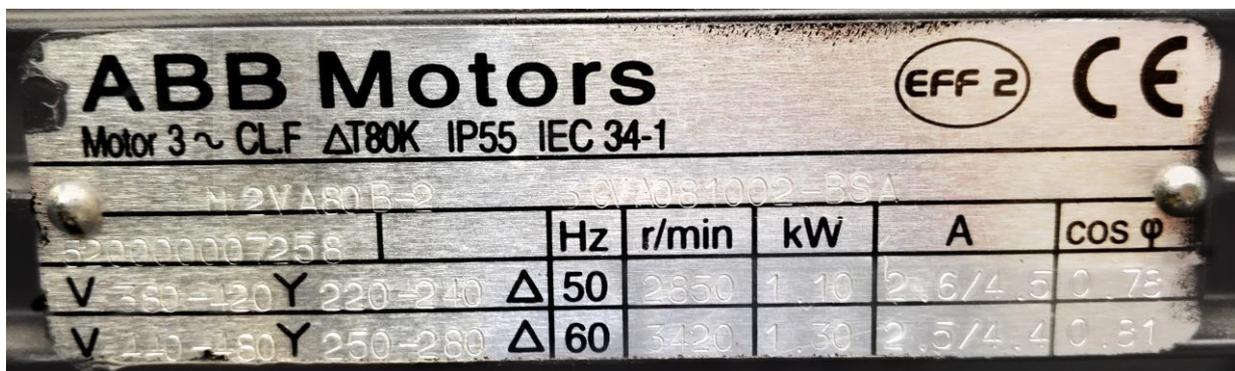


Figura 2-5. Placa del motor eléctrico que mueve el ventilador del motor.

- Una brida y un medidor de torque unidos al eje de salida del motor. Estos elementos se encargan de unir el motor con el elemento a ensayar y de dar la información de la velocidad angular y el par que está proporcionando el motor. Con estos datos se puede realizar el producto de ambas señales (poniendo atención a las unidades) y obtener la potencia que está dando el motor en cada instante de tiempo. El medidor de par se puede ver en detalle en la figura 2-6 y sus características se pueden ver en la placa que se muestra en la figura 2-7.

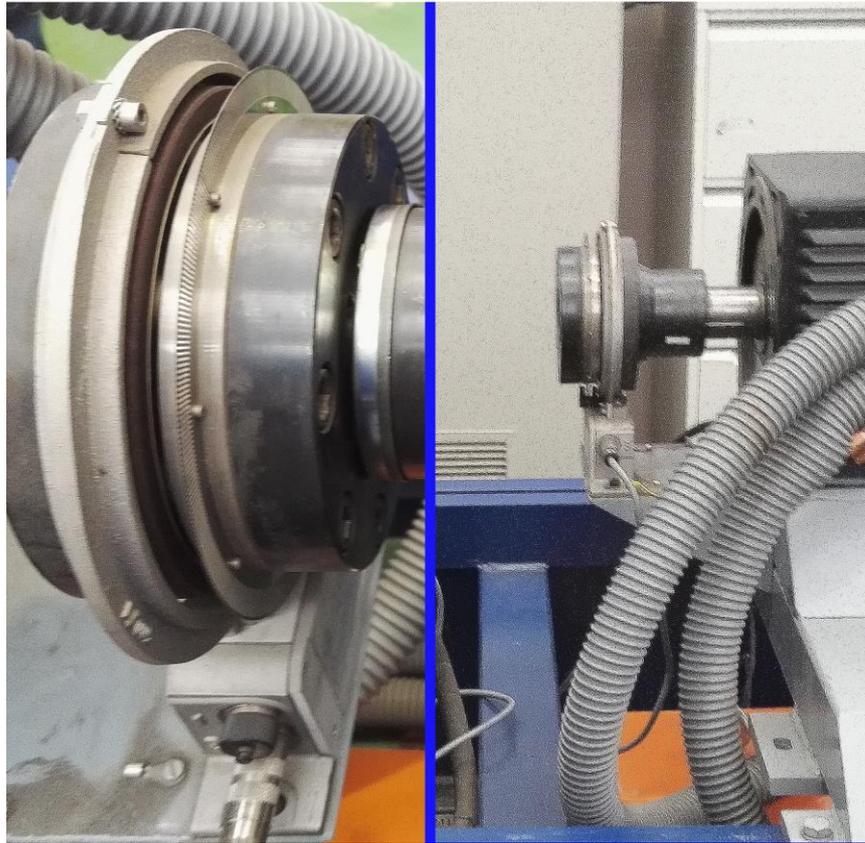


Figura 2-6. Medidor de torque del motor.



Figura 2-7. Placa de características del medidor de torque del motor.

3. Una brida y un medidor de torque unidos a un reductor. Estos elementos son muy similares a los expuestos anteriormente, pero en este caso se encargan de unir el elemento a ensayar con un reductor y de dar la información de la velocidad angular y el par que se están transmitiendo a través del elemento ensayado. Las características de este medidor son diferentes a las del anterior, lo que tendrá algunas consecuencias en los resultados que se describirán posteriormente. Este medidor de par se puede ver en detalle en la figura 2-8 y sus características se pueden ver en la placa que se muestra en la figura 2-9.

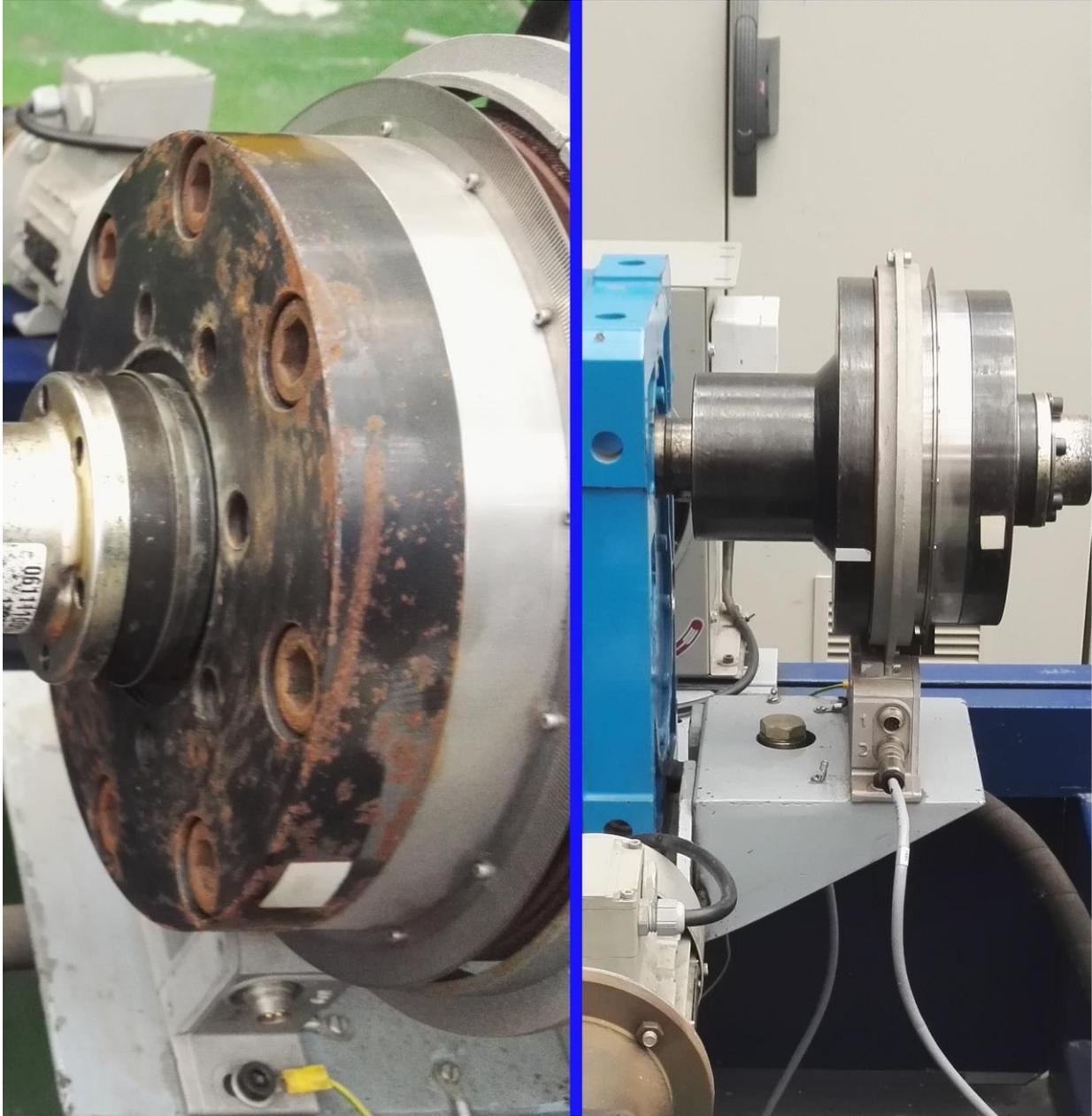


Figura 2-8. Medidor de torque del freno.



Figura 2-9. Placa de características del medidor de torque del freno.

4. Un reductor de ejes paralelos, que conecta el generador que actúa de freno con la brida y el medidor de torque. Este reductor se acompaña de un sistema de refrigeración del aceite del reductor. Aunque este sistema ya estaba instalado en el momento de comenzar el proyecto, se pudo saber a través del técnico especialista de laboratorio que el sistema de refrigeración se instaló posteriormente al diseño del banco de pruebas ya que el reductor sufrió una pérdida de aceite debido a un exceso de temperatura del reductor. El reductor se encontraba cubierto por una carcasa protectora que favorecía el aumento de la temperatura del aceite del reductor. A continuación, se muestran imágenes del reductor en la figura 2-10, sus características en la figura 2-11, la bomba del sistema de refrigeración en la figura 2-12 y el radiador perteneciente a dicho sistema en la figura 2-13.

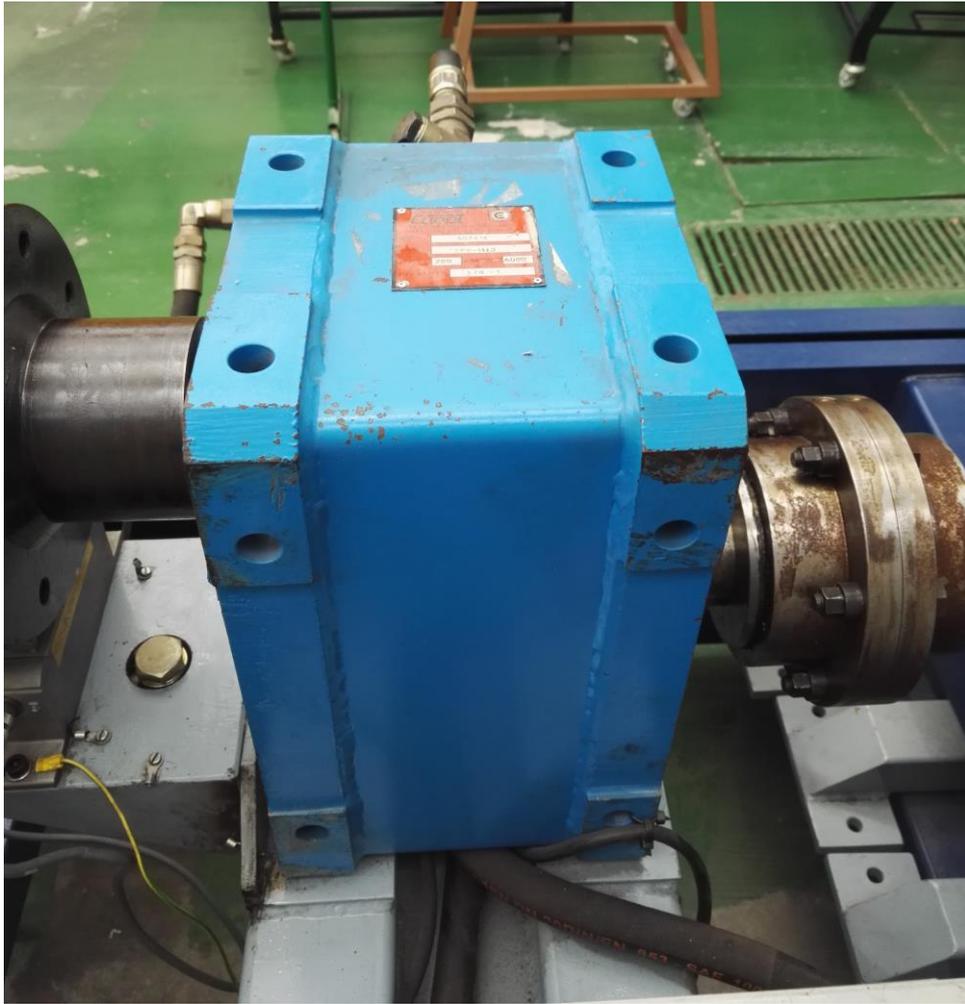


Figura 2-10. Reductor de ejes paralelos.



Figura 2-11. Placa de características del reductor.



Figura 2-12. Bomba y mando de activo/inactivo del sistema de refrigeración del reductor.



Figura 2-13. Radiador del sistema de refrigeración.

5. Un generador eléctrico de gran potencia acompañado, al igual que en el caso del motor, se acompaña de un motor de menor potencia cuya función es mover el ventilador que refrigera al generador. Este generador es el que realiza las funciones de freno en el banco de ensayos, por lo que de aquí en adelante cuando se haga referencia al freno será equivalente a hablar del generador eléctrico. En las figuras 2-14 y 2-16 se puede ver la disposición del generador y del motor, y las características de cada uno de ellos vienen reflejadas en las placas de las figuras 2-15 y 2-17.

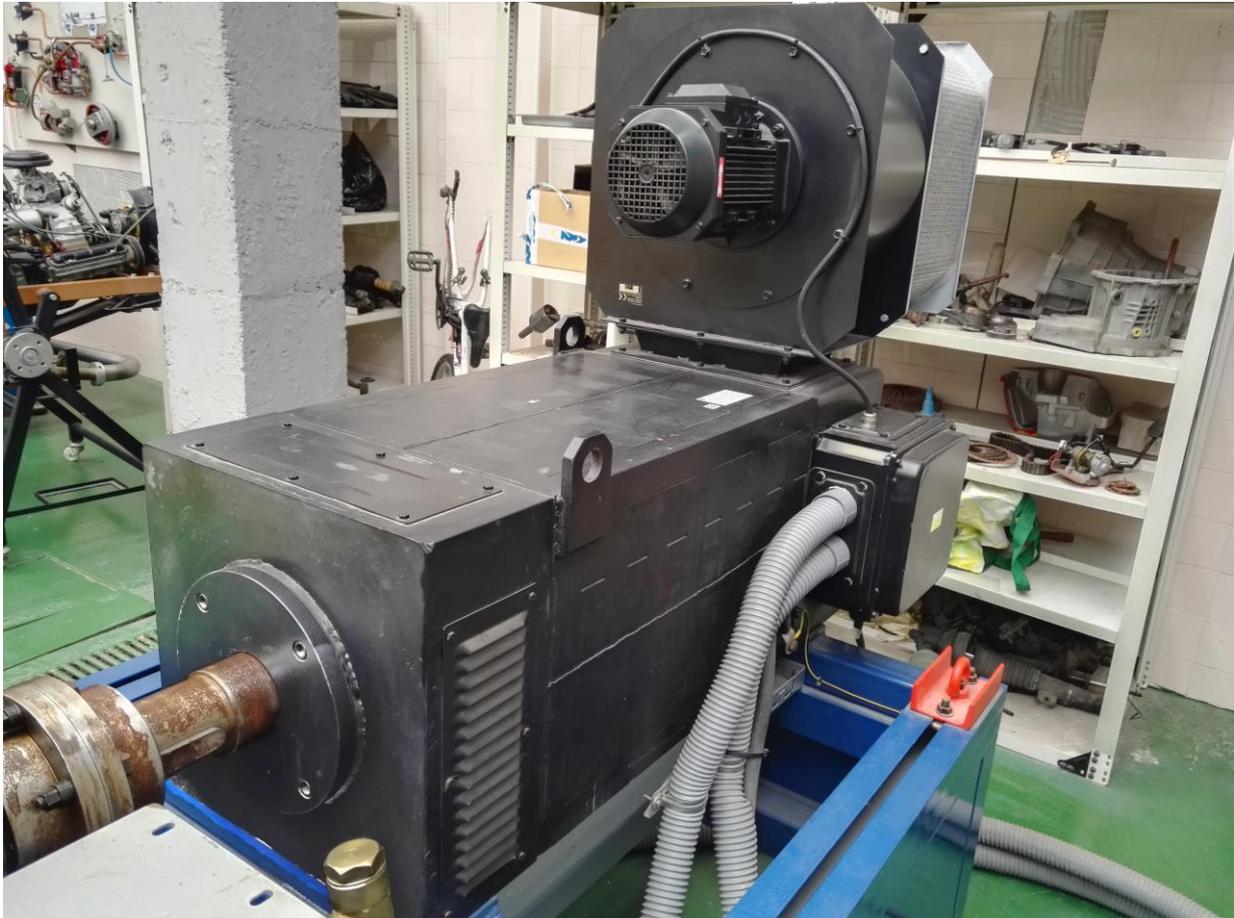


Figura 2-14. Freno.

		<b>TETRAVEC</b>		CO.M.E.R. S.r.l. Via Oroboni, 26/28 27029 - VIGEVANO (PV)							
Type	250L . 5	s/n	428B/05	Year	MAG 2005	IP	23	Ins. cl.	F		
V nom.	400	r.p.m. nom.	705	Hz max	240	r.p.m. max	4800				
Duty S1		Nm	3414	Kw	252	A	450	Hz	35.9	Cos $\phi$	0.88
Duty S		Nm		Kw		A		Hz		Cos $\phi$	
Vent.	230 V -	11.4 A -	50Hz	Brake V		Brake A					
Vent.	400 V -	6.6 A -	50Hz	Trasd. EH80C1024Z5L14X3MR.197+295							
Code											
<b>POWERTECH</b>						by CO.M.E.R. Vigevano - ITALY					

Figura 2-15. Placa de características del freno.

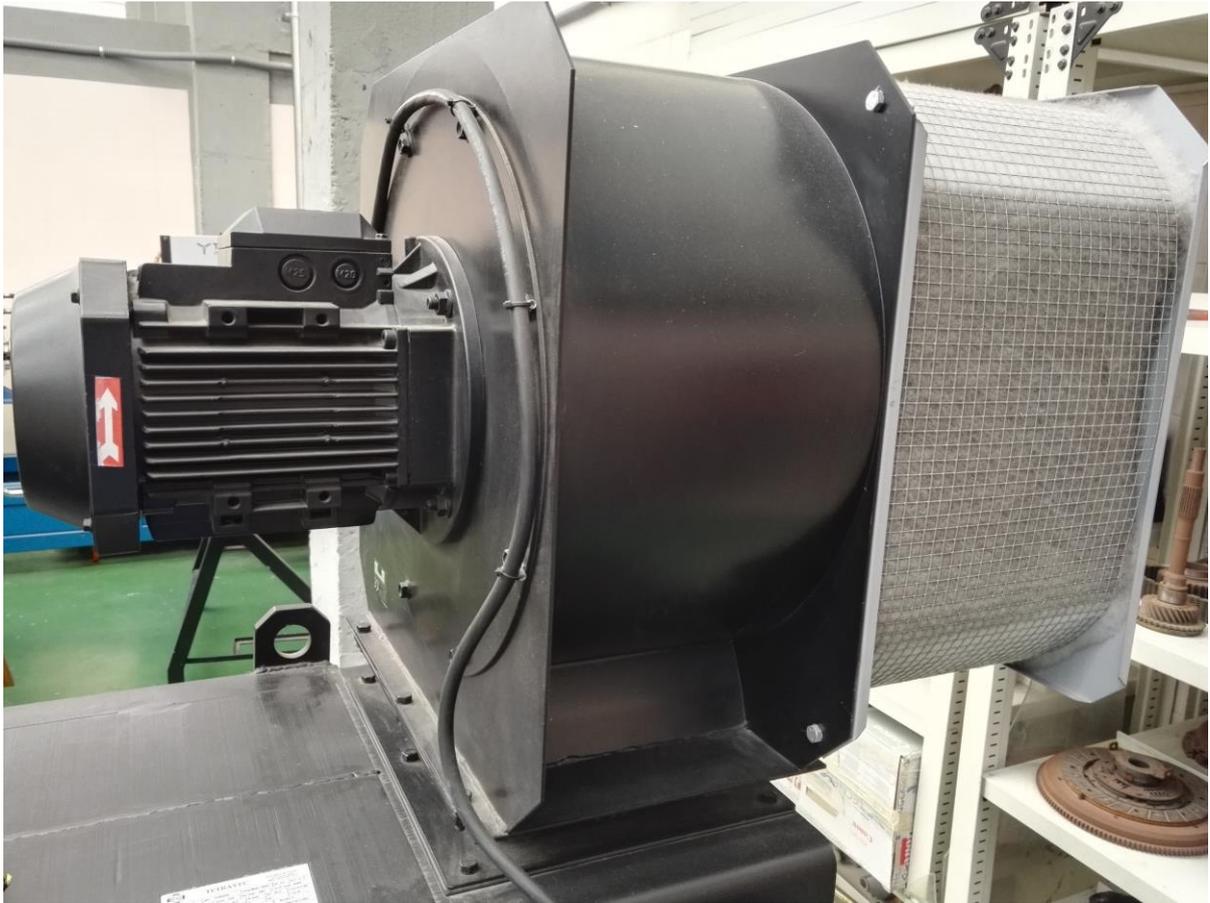


Figura 2-16. Motor eléctrico y ventilador que refrigeran al freno.

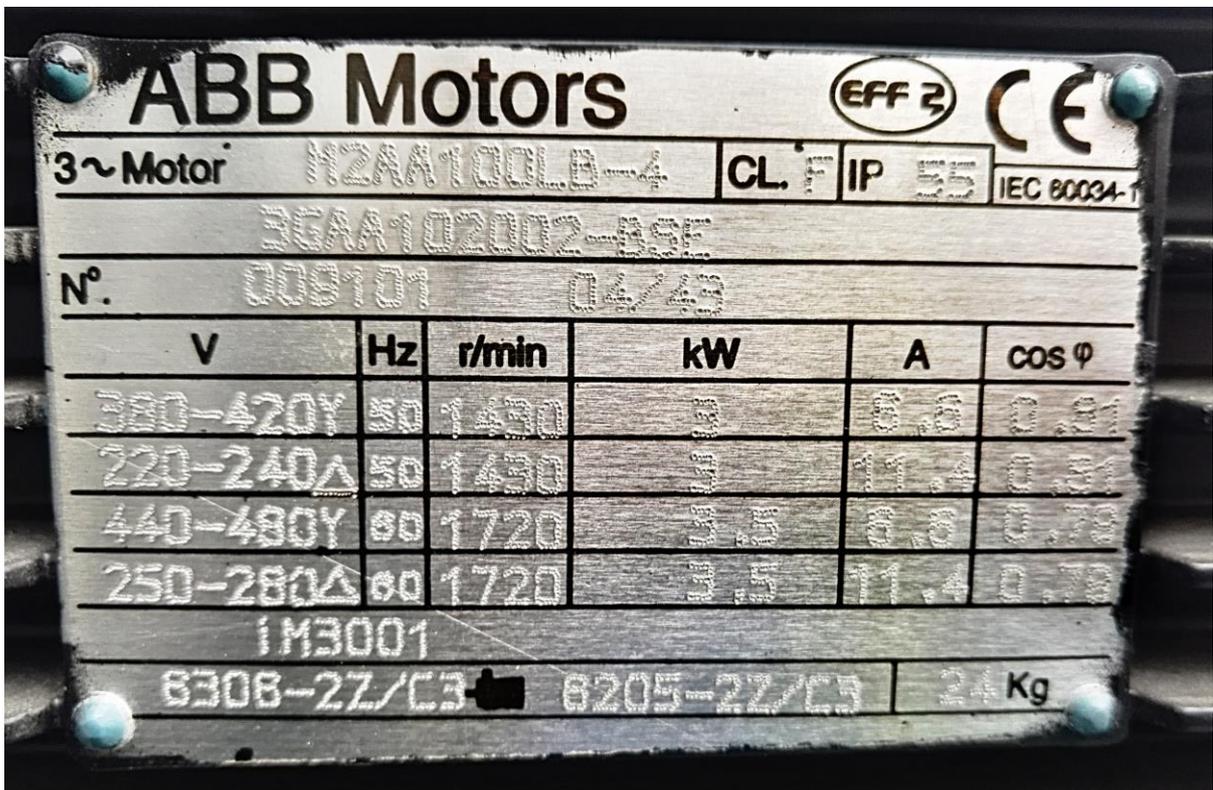


Figura 2-17. Placa del motor eléctrico que mueve el ventilador del freno.

6. El chasis o estructura del banco. De esta estructura cabe destacar que dispone de diferentes vigas paralelas por si el elemento a ensayar tiene la entrada y la salida alineadas o, por el contrario, se encuentran en planos paralelos. Otro detalle a tener en cuenta del chasis es que permite regular la altura de sus patas por si el suelo del laboratorio no se encuentra nivelado. En la figura 2-18 se muestra una imagen del banco donde se puede ver el chasis.

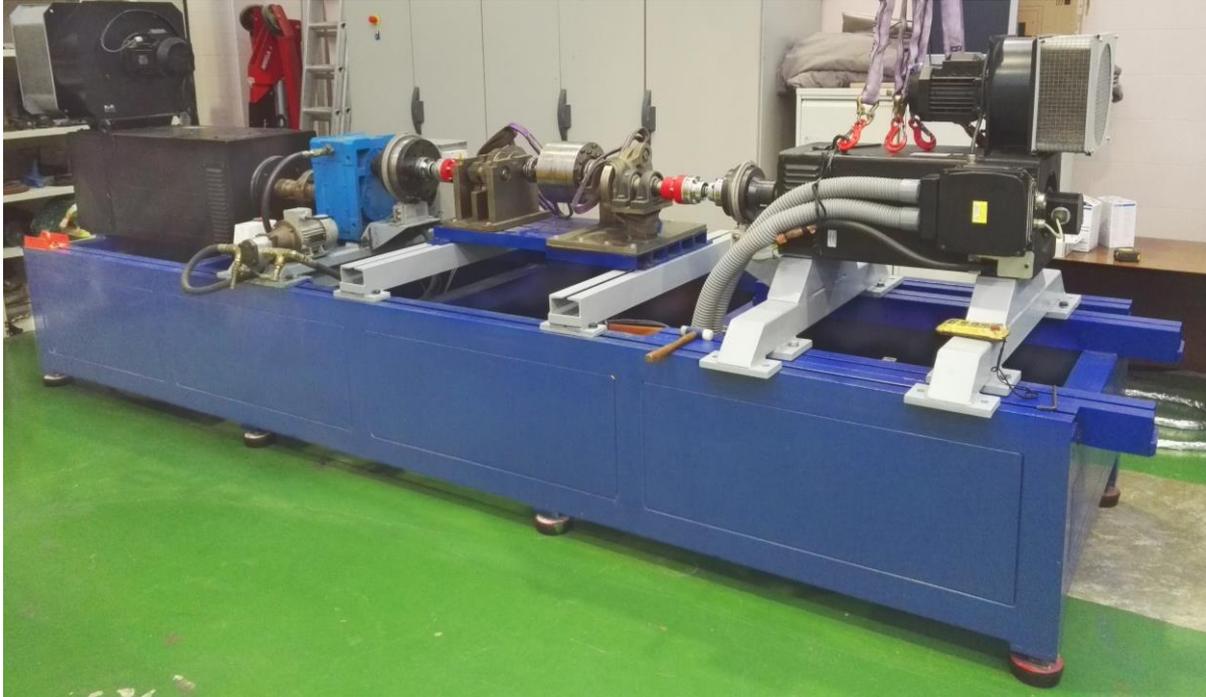


Figura 2-18. Chasis del banco en color azul con patas regulables.

## 2.2 Elementos electrónicos e informáticos

Además de estos elementos se cuenta con un ordenador con el software de control del motor y del freno, y un sistema de adquisición de datos. Estos datos son procesados por este mismo software que se usa para el control. Para evitar interferencias electromagnéticas en los datos procedentes de los medidores de par, los cables que van desde estos hasta el sistema de adquisición de datos se han aislado, como puede verse en la figura 2-19. Esto redujo considerablemente los errores de lectura en el momento de su implantación según informaron los profesores asociados al proyecto.



Figura 2-19. Cables protegidos contra las interferencias electromagnéticas.

El software del banco de ensayos permite controlar dos parámetros: la velocidad del motor y la carga del freno. Este control se puede realizar bien a mano o bien en modo automático. En este modo de control los parámetros de velocidad del motor y carga de freno siguen una evolución temporal previamente programada.

Solo se pueden programar 7 puntos de ambos parámetros, por lo que si no son suficientes para que las curvas que sigan ambos parámetros tengan la forma que se desea, se programan varias fases y el software las van ejecutando en orden. Sin embargo, solo se puede encender manualmente el motor y el freno, y esto obliga a comenzar y terminar la programación con tramos en los que los parámetros de control estén a cero para tener tiempo de encender o apagar el motor y el generador según corresponda. Aunque se programe una aceleración o un aumento de la carga de freno, no surtirán ningún efecto si el motor y el freno están inactivos.

Además, el software con el que se está trabajando incluye otras características que vale la pena describir. Una de ellas es que se puede crear una nueva preparación para guardar los parámetros característicos de cada elemento a ensayar. Aunque la opción se llame nueva caja de cambios, se puede definir una para cualquier elemento que se vaya a ensayar en el banco, aunque no sea una caja de cambios.

Otra opción dentro de la caja de cambios que se esté configurando es definir unas alarmas en velocidad y en par tanto a la entrada como a la salida del elemento a ensayar. Estas alarmas se establecen en función del elemento más susceptible de sufrir un fallo. En la figura 2-20 se muestra un ejemplo de la pantalla de configuración de alarmas. Como puede verse en la figura 2-20, se pueden establecer alarmas de otros parámetros adicionales (presión, temperatura, etc). En el momento que se supera alguna de estas alarmas, el ensayo de detiene automáticamente por seguridad. Es muy importante definir correctamente el valor de estas alarmas, ya que deben proteger correctamente todos los elementos durante los ensayos, pero si se establecen demasiado bajos por un exceso de celo los ensayos finalizarán siempre prematuramente e impedirán obtener los datos que se desean. Por todo esto, si se desconocen los límites de los elementos que se van a ensayar, lo más recomendable y seguro es establecer unas alarmas bajas y realizar los ensayos manualmente. Si se comprueba que ningún elemento ha sufrido daño, se puede elevar el valor de las alarmas paulatinamente hasta encontrar el valor que encuentre el mejor equilibrio entre seguridad y funcionalidad.



Figura 2-20. Configuración de las alarmas a través del software del banco de ensayos.

Por último, hay que destacar la opción de hacer una pequeña calibración y ajuste del voltaje que está llegando al sistema de adquisición de datos. En una columna se pueden ver los valores actuales de corriente que está recibiendo en tiempo real en el momento de entrar en este ajuste. En otra columna se pueden introducir estos valores para que el sistema compense estos voltajes y lea un cero cuando reciba esta pequeña corriente residual. Esto no se puede conseguir de forma totalmente exacta por dos motivos: el sistema solo permite introducir los valores de voltaje con un solo decimal, lo cual no siempre es suficiente precisión, y los valores que se pueden leer en tiempo real varían continuamente levemente debido al ruido y a las interferencias electromagnéticas que ya se han descrito anteriormente. Conviene repasar que estos valores sean correctos antes de cada ensayo, pero en la práctica si después del calentamiento o el primer ensayo los valores no han sufrido variaciones, se considera que está correctamente calibrado y no es necesario volver a comprobar estos valores antes de cada ensayo.

# 3 CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES DE PAR

**A**ntes de empezar a realizar ensayos se tiene que someter a un periodo de calentamiento al motor y al freno. Se empieza con cinco minutos con motor y frenos inactivos, seguidos de cinco minutos con solo el motor activo y los últimos cinco minutos con motor y frenos ambos activos.

## 3.1 Primer montaje

El primer montaje que se realiza es colocando una junta cardán como elemento a ensayar, como puede verse en la figura 3-1. En realidad, la junta cardán no es el objeto real del ensayo. El verdadero objetivo de realizar estos ensayos con este elemento de unión entre el motor y el freno es evaluar los resultados que ofrece el banco de pruebas. De nada sirve realizar un ensayo tras otro sin antes verificar la veracidad de los datos que se obtienen del banco de pruebas.

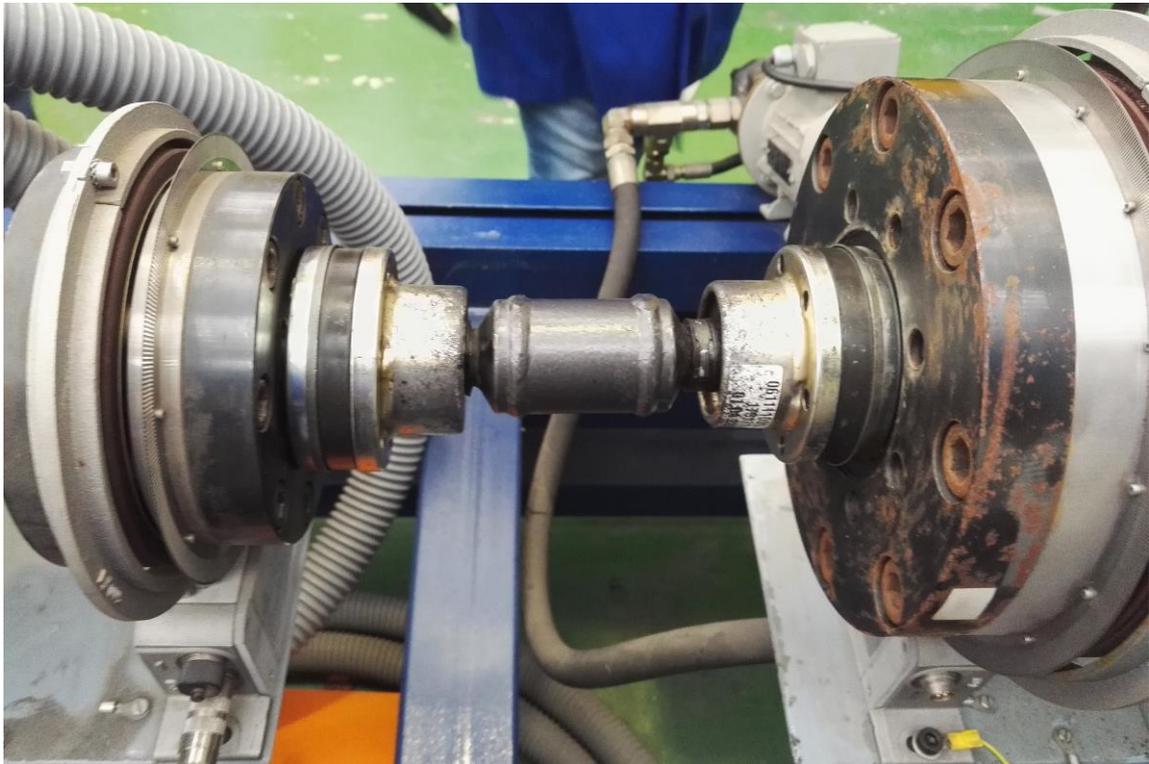


Figura 3-1. Montaje de la junta cardán, primer elemento de ensayo.

## 3.2 Opciones de calibración

Los datos que se obtienen del banco de ensayos provienen de dos fuentes que son los dos medidores de par, mientras que las señales de control se mandan al motor y al generador. Para saber si estos elementos funcionan correctamente se pueden seguir dos caminos: mandar estos instrumentos a calibrar y ajustar a una empresa externa o realizar una calibración propia.

Se realiza una calibración interna que permita el conocimiento del error de los instrumentos de medida y de actuación por parte del equipo de personas que trabaja en este proyecto. Una vez conocido este error se podrá intentar ajustar los instrumentos en la medida de lo posible, ya que ésta no es la tarea fundamental de este trabajo.

### 3.3 Primeras pruebas y errores detectados

En primer lugar, se realizan ensayos a la junta cardán como se ha enunciado antes. El motivo es que este elemento no introduce ninguna relación de transmisión entre la entrada y la salida. Ambas están conectadas directamente por la junta. De este modo se pueden realizar diferentes comparaciones para calibrar los medidores de par y los motores eléctricos:

- Se puede comprobar si la velocidad que se introduce como orden en el motor coincide con la capturada por el medidor de par del motor. Además, al estar ambos medidores conectados por la junta cardán, esta velocidad también tiene que ser recogida con el mismo valor por el medidor de par de la salida.
- Por el mismo motivo que se ha esgrimido en el caso anterior, los medidores de par de entrada y salida deben recoger los mismos valores para los pares de motor y de freno. Esto se puede comprobar tanto en los ensayos en los que solo se varía la velocidad y en los que se fija la velocidad y se va cambiando el valor de la carga del freno.
- Ligado a este último punto, se puede comprobar que la orden de la carga del freno que se le da al generador funciona correctamente.

Tras hacer varias pruebas con la junta aparecía de forma aleatoria un desfase entre el par medido por el medidor de par del motor y el medido por el medidor de par del freno. Dado que no se conocía con certeza donde podía erradicar la causa de dicho desfase, se iban realizando ensayos manuales sin seguir un patrón bien definido. Los ensayos se iban modificando y realizando en función de la hipótesis que se quisiera comprobar en cada momento.

Se podía ver que para cada velocidad elegida del motor el par del freno se encontraba siempre ligeramente por encima. Sin embargo, donde más se acusaba este desfase era al final del ensayo, cuando el motor se encuentra parado, pero aún se estaban leyendo los datos. En esta situación el par motor se encontraba en torno a los 2-4 Nm mientras que el par de freno se encontraba entorno a los 20-25 Nm. En la figuras 3-2 se muestra un fragmento del registro de velocidades del motor y del freno donde se comprueba que ambos se encuentran con velocidad nula, y en la figura 3-3 su registro correspondiente de los pares del motor y del freno en el que se puede ver el desfase descrito.

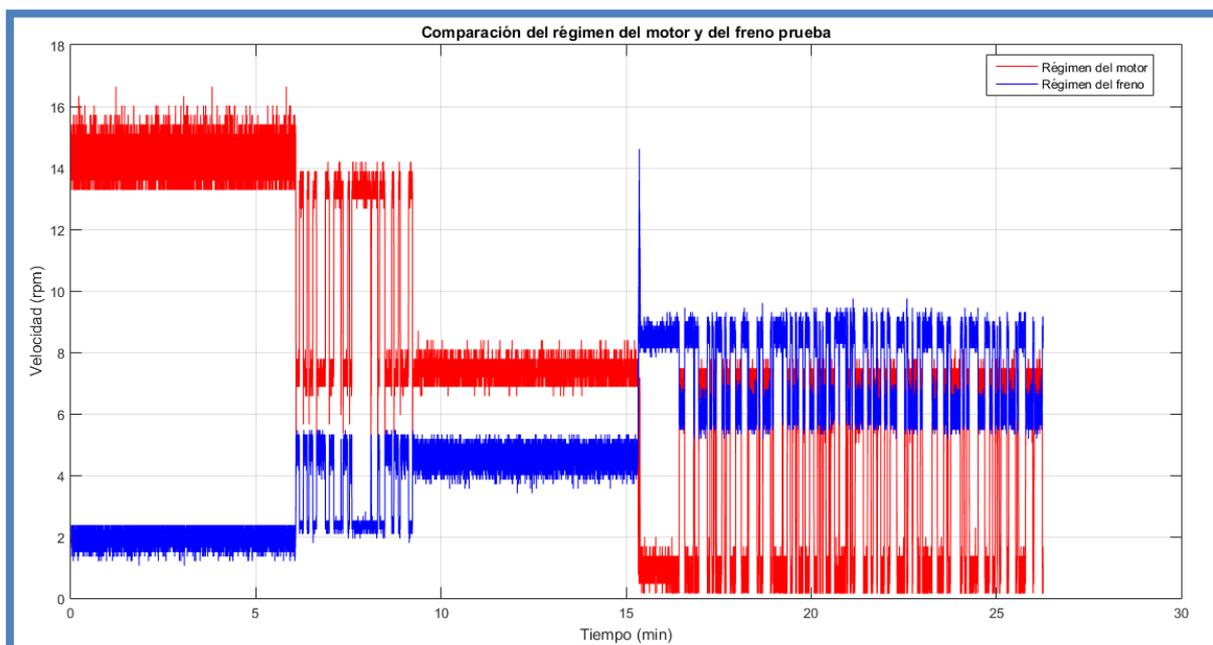


Figura 3-2. Comparación de velocidades recogidas por los dos medidores de par.

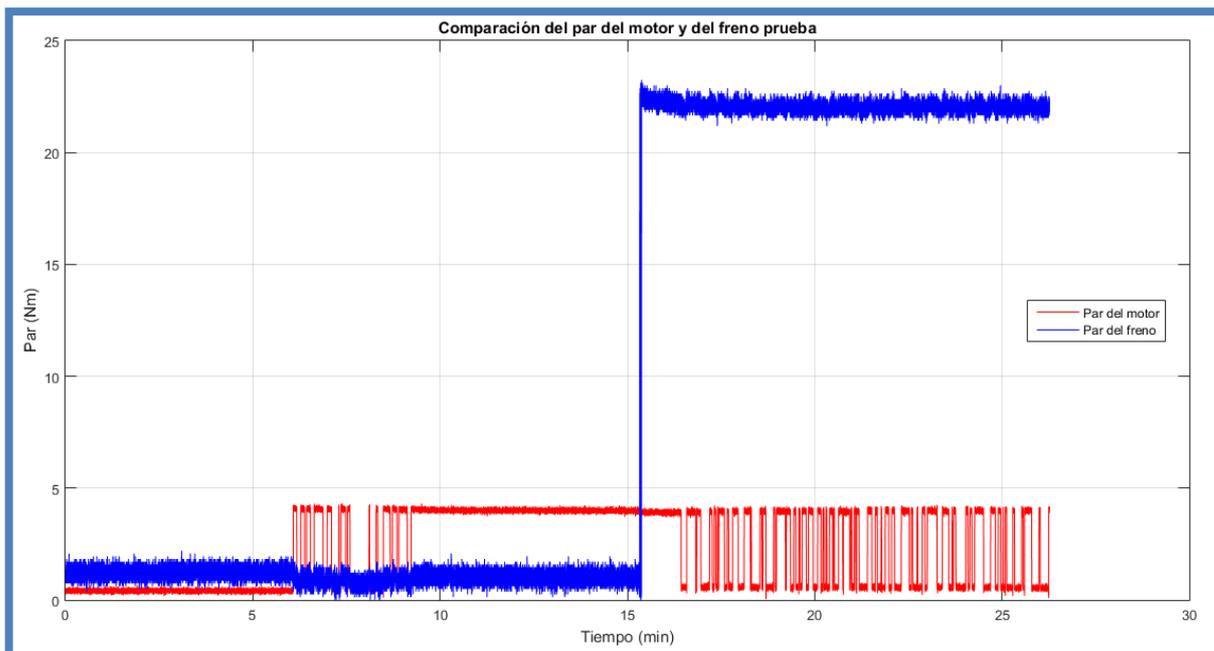


Figura 3-3. Comparación de pares recogidos por los dos medidores de par.

Sin embargo, este error no siempre se daba después de cada ensayo, por lo que no se podía tener en cuenta como un error constante y tratar los datos teniendo esto en cuenta. Además, el hecho de que se diera solo en ocasiones hizo que fuera difícil encontrar una explicación sólida del motivo que causaba esta discordancia entre los datos de los medidores de par. Algunas de las teorías que se habían puesto encima de la mesa eran las siguientes:

- El error dependía de la posición en la que se encontraba la junta. Esta teoría se fundamentó en que si se movía la junta manualmente mientras se realizaba la medición de los datos, el desfase entre los pares de motor y freno iba apareciendo y desapareciendo.
- El error era simplemente una consecuencia de la diferencia de características de ambos medidores de par. Como se puede ver en las imágenes de las placas de características de los medidores de par, el medidor de par del motor puede medir hasta un par nominal de 1 kNm mientras que el medidor de par del freno puede medir hasta un par nominal de 5 kNm. Por tanto, la diferencia se puede deber solo a no haber tenido en cuenta que cada medidor de par tiene un rango de medición diferente.
- El error era debido a un error interno en los medidores de par. Esta explicación daba, en principio, muy poco margen de actuación dado que requeriría una calibración y ajuste externos. Esto, como ya se argumentó con anterioridad, supondrían muchos problemas añadidos.

De estas tres opciones, la más factible a priori es la segunda que se ha explicado. Sin embargo, aunque este factor influye efectivamente, no da explicación a dos cuestiones: la diferencia entre ambos medidores de par cuando el banco de ensayos está parado es demasiado elevado, aunque se tenga en cuenta los diferentes rangos de medición de cada uno, y tampoco da explicación a por qué este error no aparece siempre como una constante si no que hay veces que ocurre y otras que no.

### 3.4 Desmontajes en busca de información

#### 3.4.1 Comprobación del apriete de los tornillos y desmontaje de la carcasa

Se empieza a contemplar entonces la primera de las teorías. En concreto se pensó que, si el desfase era dependiente de la posición, debía de haber un error asociado al montaje que lo produjera. Más concretamente, este error se debía a un apriete desigual de los tornillos que unían la junta cardán con las juntas de los medidores de par.

Es fácil comprobar que los tornillos que unen la junta y el motor están apretados correctamente, ya que estos están

expuestos. Sin embargo, el acceso a los tornillos que unen el freno con la junta es más complejo ya que están cubiertos por una carcasa protectora que tapa el reductor. Estos tornillos son visibles, pero para realizar un apriete correcto era necesario desmontar la carcasa protectora.

Esta carcasa fue instalada por el fabricante del banco de ensayos, y su diseño no ayudó a que ésta fuera retirada debido a que la única forma de retirarla es desconectar la manguera que conecta la bomba de aceite con el reductor. Esta sería una operación complicada ya que la manguera puede contener aceite y al desconectarla se pueden producir fugas que disminuyan el nivel de aceite del reductor y afecten a otros elementos del banco como los medidores de par. Por esta razón se decide que la mejor opción es retirar los cuatro tornillos y tuercas que sujetan la protección al chasis del banco y realizar un corte en la carcasa que permita retirarla con ayuda del puente grúa y poder pasar la manguera sin tener que desconectarla.



Figura 3-4. Operación de corte y retirada de la carcasa.

Realizar este corte también comporta un riesgo ya que podría dañar en el proceso a la manguera. Además, hay que tener cuidado con las chispas que saltan mientras se realiza el corte. Por todo esto, se marca cuidadosamente la zona de corte, se cubren y protegen todos los elementos de la mejor forma posible y el corte es llevado a cabo por el técnico especialista de laboratorio. En la figura 3-4 se puede ver como se fue realizando el corte y las protecciones necesarias para llevarlo a cabo.

Una vez hecho esto se retira la carcasa enganchándola con una eslinga al puente grúa. Esta operación se realiza cuidadosamente, ya que los filos producidos por el corte de la carcasa pueden dar lugar a cortes. Una vez retirada, se repasa el corte, se eliminan los filos y se pinta para que quede lista para volver a usarse. Sin embargo, se almacena ya que de momento no es necesaria.

### 3.4.2 Reparaciones

Al retirar la carcasa queda al descubierto que los ejes han sufrido una gran oxidación en sus superficies debido al alto grado de humedad que hay en el laboratorio. De modo que, aunque no era el principal objetivo de la operación, se procede a lijar estas superficies para eliminar la mayor cantidad de óxido posible y se protege posteriormente todo con vaselina para dotar de protección a estos elementos.

Además, se puede observar a través del tapón de nivel del reductor que no tiene suficiente aceite, ya que debería poder verse el nivel a través de él. Sin embargo, no se aprecia aceite en el interior del reductor como puede comprobarse en la figura 3-5. Se cree que cuando el reductor tuvo la fuga por exceso de temperatura y se mandó a reparar al fabricante e instaló el sistema de refrigeración, éste no repuso suficiente aceite al reductor o no tuvo en cuenta que tenía que incrementar su cantidad para rellenar las conducciones del sistema de refrigeración.



Figura 3-5. Tapón de nivel de aceite vacío del reductor.

Sea cual fuera el motivo, se tomó contacto con el fabricante del reductor y se pudo determinar el tipo de aceite adecuado para el reductor. Además, se localizaron existencias de este aceite en el laboratorio y se fue reponiendo cuidadosamente. Hubo que tomar especiales precauciones con dos aspectos. El primero de ellos fue que al salir aire del interior del reductor formaban burbujas que podían expulsar el aceite de forma repentina. El segundo punto fue que, para tener mejor control de que la cantidad de aceite no fuera excesiva, se abrieron los dos puntos de llenado del sistema para poder reponer el aceite por uno de ellos y observar que la cantidad de aceite introducido no desbordara por el segundo punto. El primer punto está situado junto a la entrada de la manguera al reductor y el segundo junto al radiador. La operación de llenado fue muy lenta ya que el aceite del reductor es muy viscoso y cae lentamente, y por los aspectos que se acaban de describir.



Figura 3-6. Tapón de nivel de aceite lleno del reductor.

Una vez finalizada la operación de llenado de aceite, éste es visible a través del tapón de nivel como se muestra en la figura 3-6, por lo que se sabe que el reductor ya posee la cantidad de aceite adecuada.

Afortunadamente el banco no había funcionado el suficiente tiempo como para que la falta de aceite haya causado daños en el reductor, pero de no haberlo detectado a tiempo es muy probable que el reductor hubiera acusado deterioro. Se puede ver como al acabar el llenado del reductor ya es visible el nivel de aceite a través del tapón del reductor.

Para acabar con el apartado de reparaciones, se detectaron grietas en las soldaduras del soporte del medidor de par del freno. La causa más probable de este fallo son las vibraciones propias de un banco de ensayos unidas a la mala soldadura, ya que esta se ha lijado para mejorar su aspecto estético sacrificando su función estructural. Para solucionarlo se aplica un nuevo cordón de soldadura. En la figura 3-7 se pueden ver las grietas en el lateral izquierdo y el resultado de la reparación mediante una nueva soldadura en la figura 3-8. De igual modo, se pueden ver las grietas en el lateral derecho en la figura 3-9 y el resultado de la reparación mediante una nueva soldadura en la figura 3-10.



Figura 3-7. Grietas en la soldadura del lateral izquierdo.



Figura 3-8. Nueva soldadura del lateral izquierdo.

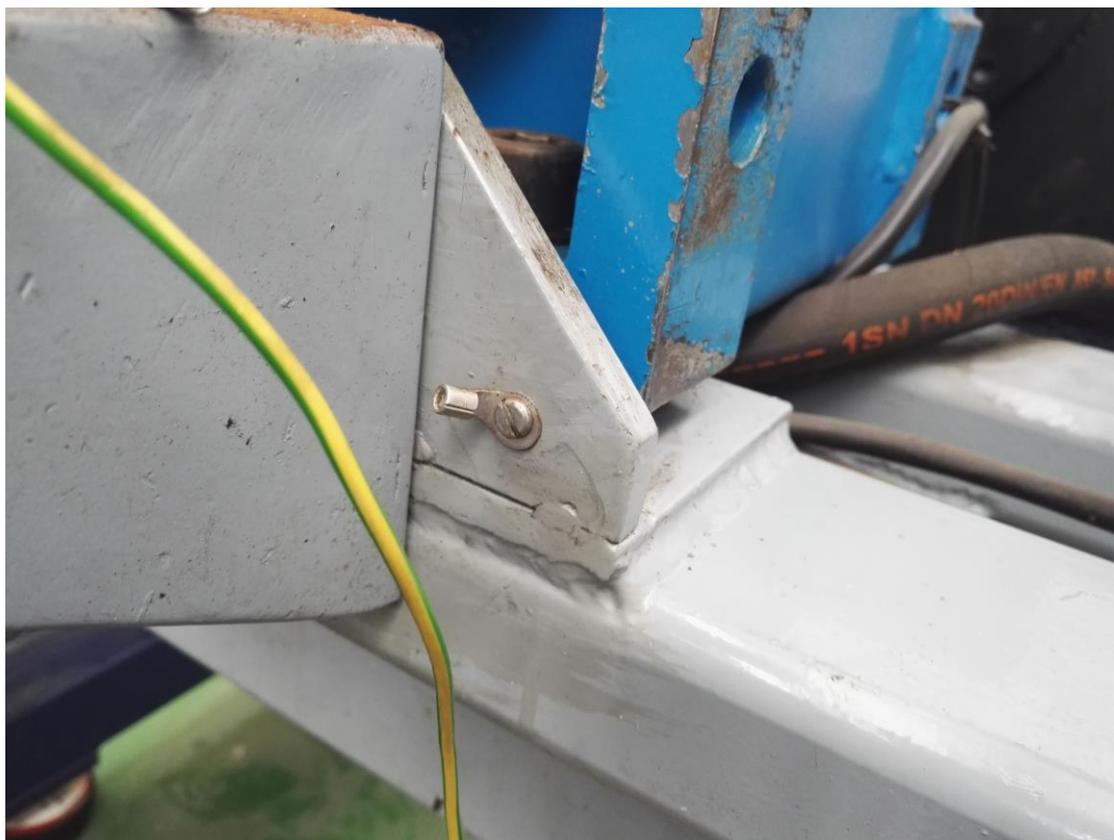


Figura 3-9. Grietas en la soldadura del lateral derecho.



Figura 3-10. Nueva soldadura del lateral derecho.

### 3.4.3 Comprobación de tornillos y desmontaje de la junta y la brida

Una vez realizadas estas tareas se centra la atención en el objetivo principal de encontrar la causa del desfase entre el par de freno y el par motor. Tras retirar la carcasa ya se tiene acceso a los tornillos que fijan la junta cardán a la junta del medidor de par. Sin embargo, estos tornillos tenían un apriete bastante bueno y no podían ser la causa de la diferencia entre ambos pares registrados.

Tras comprobarlos se empieza a dar más peso a la hipótesis de la diferencia de rango entre los medidores de par. Sin embargo, se sigue sin encontrar la causa de la aparición aleatoria de la diferencia entre el par de freno y el par motor. En busca de ella se retira la junta cardán retirando los tornillos y arandelas que se muestran en la figura 3-11 para comprobar los tornillos que son visibles en la brida que pertenece al medidor de par. En la figura 3-12 se muestra como queda el banco de ensayos tras retirar la junta.

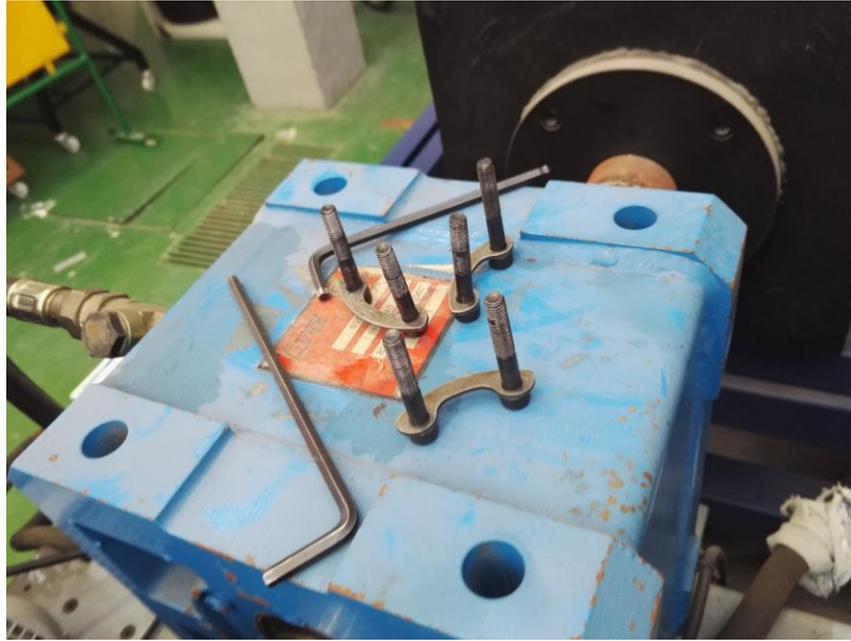


Figura 3-11. Tornillos y arandelas que unen la junta a la brida.



Figura 3-12. Banco de ensayos sin la junta.

Una vez retirada la junta cardán se retiran los tornillos indicados anteriormente. Esto permitió retirar la parte de la brida del medidor de par que sirve de unión entre éste y el elemento a ensayar. Este elemento es muy pesado, y puede generar una flecha que haga que el medidor de par tenga una lectura más elevada del par de freno. Sin embargo, como se ha analizado anteriormente para la diferencia de rango entre medidores de par, la flecha que produce este elemento es constante y no pueden generar una diferencia de par aleatoria.

En el interior de la junta se pueden encontrar unos tornillos precintados y que, por consiguiente, no han sido manipulados en ningún momento desde que el fabricante colocó el precinto. Esto descarta un apriete desigual al original con el que salió de fábrica.

### 3.5 Continuación de la investigación de los errores detectados

En este punto parece que ninguna de las dos teorías explica todas las características de los datos que se habían obtenido hasta el momento. Por tanto, parece que los resultados vienen dados por un error interno en los medidores de par, lo que dejaría muy poco margen de maniobra como se expuso anteriormente.

Sin embargo, se sigue ahondando en ellas para llegar a la raíz de la causa de estos errores, ya que se cree que alguna de ellas está detrás de su origen. Se comienza retomando la teoría de la dependencia con la posición en el punto de desmontaje en el que se había finalizado la última investigación sobre estos errores, es decir, con la brida del medidor de par desmontada parcialmente.

Para ello, se mueve la brida del medidor de par manualmente con la ayuda de alguna llave Allen mientras que se captura en el ordenador los valores del par con todos los elementos inactivos (motor y freno). Hay un cierto retraso entre el instante en que se produce el movimiento (que puede observarse en la pantalla) pero este efecto era ya conocido y se tuvo en cuenta en todo momento.

El objetivo de esta prueba era encontrar las posiciones en las que aparecían los valores erróneos del par. Para ello se fue girando la brida en torno a posiciones cada 90 grados en ambas direcciones. Las posiciones se marcaban apoyándose en la localización de los tornillos como referencia. Sin embargo, los resultados que se mostraban por pantalla daban un resultado aun aleatorio a primera vista, ya que en una misma posición hay veces que aparecía el error y otras que no.

Además, este error se podía desvanecer si se paraba la toma de datos y se esperaba el suficiente tiempo antes de comenzar la siguiente prueba en el ordenador. Este hecho dio la primera pista de la causa real de los errores.

El segundo indicio lo dieron las personas que estaban moviendo la brida, ya que detectaron la posibilidad de que la aparición de error podía tener alguna relación con la fuerza que aplicaban al mover la brida entre una posición y otra.

### 3.6 Hipótesis finales y correcciones

Si se unen estos dos hechos se puede formular una nueva teoría del origen del error del medidor de par, aunque en realidad solo es una modificación más concreta de la última de las teorías. Esto es, hay elementos en el medidor de par que se quedan cargados eléctricamente cuando sobrepasan un cierto valor, en este caso superando los 20-25 Nm, y estos elementos solo se descargan cuando el ensayo ha concluido y ha pasado suficiente tiempo.

Este es un error del medidor de par relacionado con la derivación a tierra que debe ser la encargada de descargar estos elementos. Se nota que el punto de conexión a tierra en la carcasa del medidor de par no parece el más adecuado ya que ésta tiene un tratamiento de galvanizado cuya finalidad es evitar la corrosión y, por tanto, no conduce adecuadamente la electricidad.

Para comprobar esta teoría se desmonta la tapa del medidor de par retirando los dos tornillos que la sujetan y se busca en el interior el punto de toma de tierra. En la figura 3-14 se muestra el interior del medidor de par. Como no se dispone en un primer momento del esquema electrónico, se prueba con distintos puntos dentro del medidor de par que podrían ser el punto de conexión a tierra y con un cable conectado a una tierra se va probando en los puntos. Mientras se realizan estas pruebas, se va mirando la lectura del par por pantalla y se detecta el punto en el que se descargan eléctricamente los componentes del medidor de par al conectarlo correctamente con la tierra. En la lectura del par se podía ver como baja del nivel de 20-25 Nm al valor de 0 Nm. Además, para asegurarse de que

el problema radicaba en este punto, se comprueba con la ayuda de un multímetro que hay una diferencia de voltaje de 0,06 V entre el punto de conexión a tierra interno al medidor de par y el punto de la carcasa donde estaba situado la toma de tierra anteriormente.

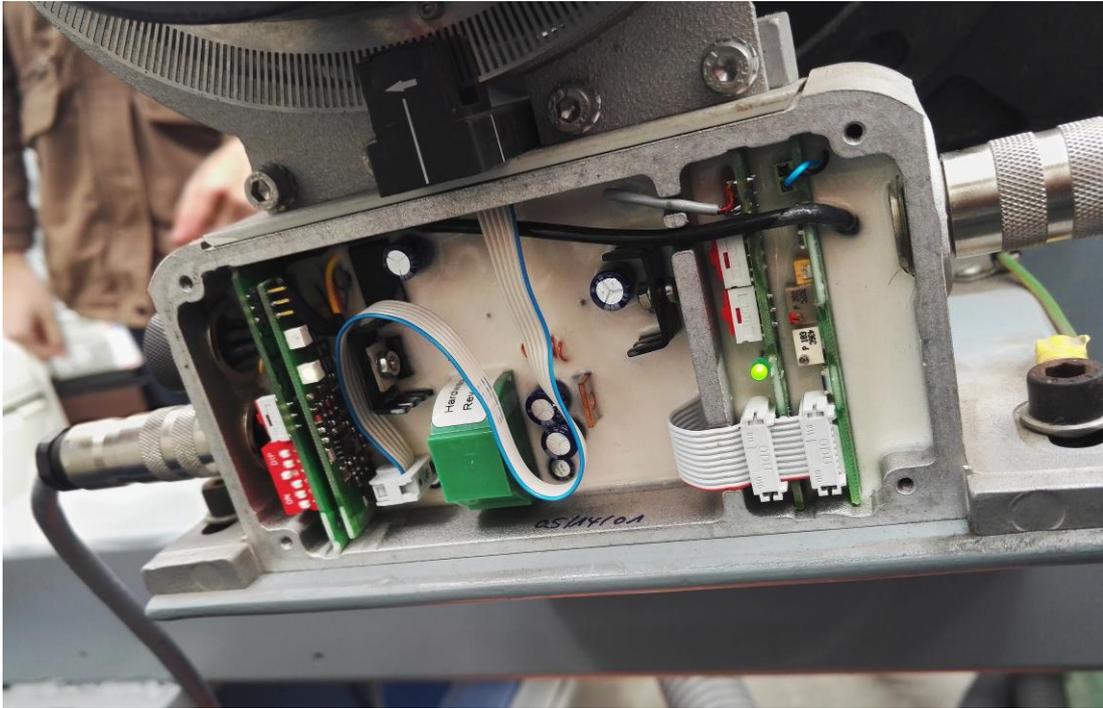


Figura 3-13. Medidor de torque del motor abierto.

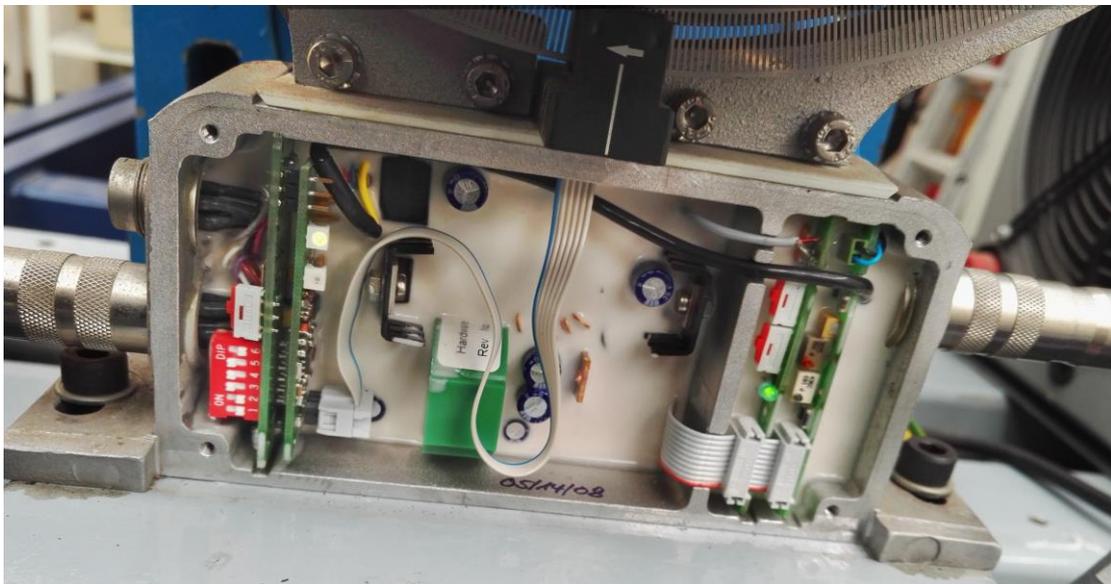


Figura 3-14. Medidor de torque del freno abierto.

Posteriormente, y habiendo estudiado el esquema electrónico del dispositivo se instala correctamente la tierra en el medidor de par. Dado que los dos medidores de par sufrían el mismo problema, se instaló la tierra adecuadamente en ambos. En la figura 3-13 se muestra el interior del medidor de par del motor abierto para instalar la tierra.

Una vez solucionado las causas de los problemas que había causado la mala puesta a tierra de los medidores de par, es momento de volver a montar la parte de la brida desmontada y volver a colocar la junta cardán para realizar los ensayos de calibración y comprobar que los resultados experimentales son coherentes con la teoría.

### 3.7 Primeras conclusiones

Antes de comenzar con los ensayos de calibración, ya se han podido obtener algunas conclusiones del desmontaje realizado. La más importante, que se acaba de explicar, es el origen aleatorio de la diferencia de medida entre el par de freno y el par motor a causa de una mala conexión a tierra de los medidores de par. La segunda es que la diferencia de rango de medida también afectaba a los resultados, ya que en el medidor de par del motor no se apreciaba un error reseñable, pero también estaba afectado por una mala derivación a tierra. El hecho de no haberlo detectado, como en el caso del medidor de par del freno, es debido a que el efecto era mucho más visible en un medidor que puede medir hasta 5 kNm que en uno que solo puede medir hasta 1 kNm. Además de esto, la brida del medidor de par del freno es también mayor que la del motor, por lo que la flecha que genera en el medidor del freno y que puede interpretarse como un par por este instrumento de medida será mayor en el caso del medidor de par del freno.

### 3.8 Ensayos programados

#### 3.8.1 Ensayos sin carga de freno

En primer lugar, se realizan tres pruebas programadas automáticamente de la siguiente forma: la carga del freno se mantiene en cero en todo momento, mientras que la evolución de la velocidad del motor se puede ver en la figura 3-15. Con esta evolución se consigue cuantificar el comportamiento de los medidores de par tanto en la fase de régimen transitorio que se presenta tras cada cambio de velocidad como en el régimen permanente, y esto estudiado a varias velocidades.

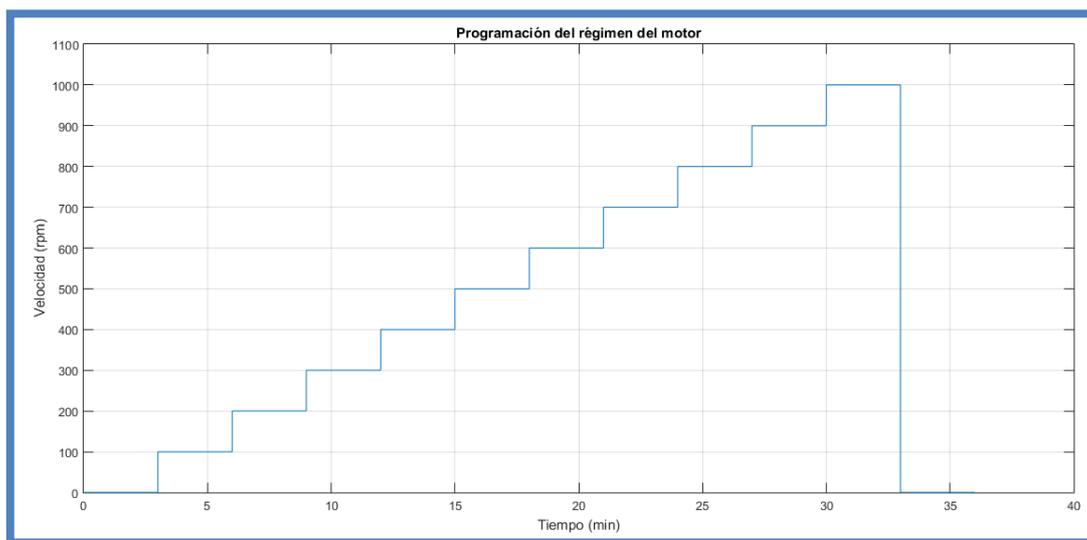


Figura 3-15. Representación de la entrada programada para el motor.

Los motivos de realizar tres experimentos iguales es poder comparar resultados y asegurar que se ha solucionado el problema de los errores aleatorios. Aunque ya se ha encontrado y razonado el origen de estas diferencias de par aleatorias, se pueden aprovechar estas pruebas para asegurarse que la solución de las tierras funciona correctamente, ya que anteriormente también se podía tener un registro de velocidades correcto dentro de la aleatoriedad. Sin embargo, con los tres ensayos se asegura que los resultados obtenidos no son fruto de la casualidad, sino que realmente se ha corregido el error de la conexión a tierra.

#### 3.8.1.1 Resultados de velocidad

En primer lugar, se representan conjuntamente los datos de la velocidad registrada por el medidor de par del motor y por el medidor de par del freno. La teoría establece que, al estar ambos unidos por una junta cardán, la relación de transmisión entre ellos es directa o igual a uno por lo que ambos resultados deben ser iguales. A continuación, se muestran los resultados obtenidos gráficamente en la figura 3-16:

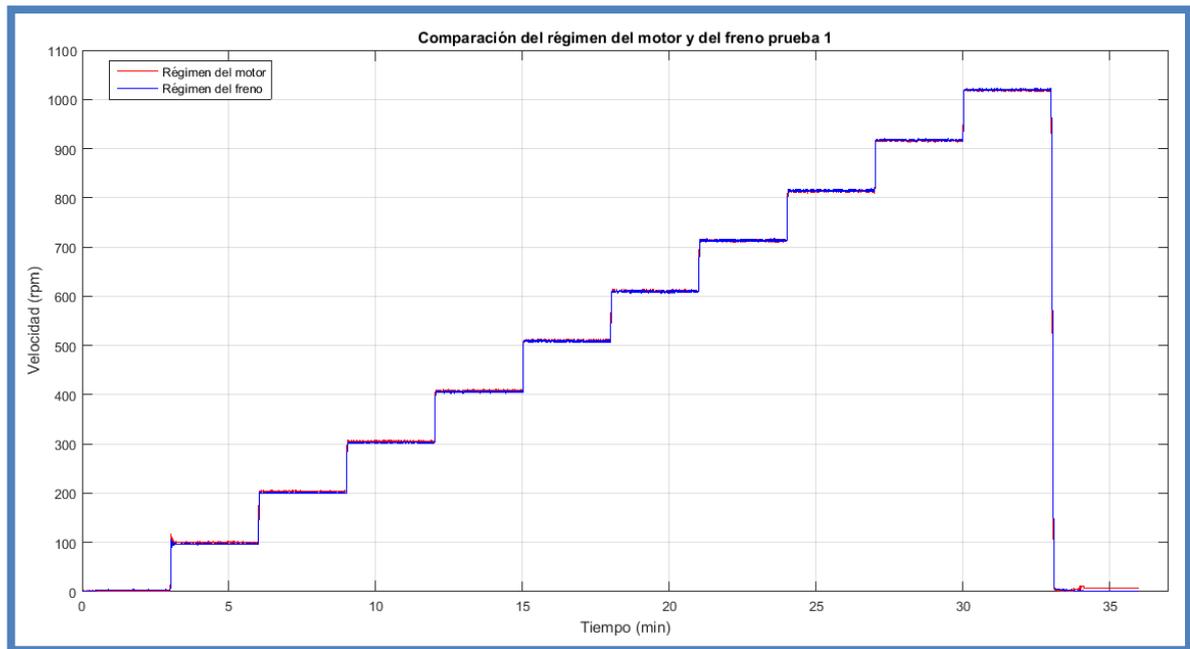


Figura 3-16. Registro de velocidades del primer ensayo.

En esta figura 3-16 se puede ver que los registros siguen las órdenes programadas, aunque se detecta que, a medida que se suben las revoluciones, los medidores de par registran una medida de velocidad ligeramente superior. Este pequeño error es porcentualmente pequeño, ya que la diferencia entre el valor de la orden de velocidad y el valor registrado va creciendo proporcionalmente al aumento de la velocidad. En este caso el error se calcularía como la diferencia entre el valor real y el valor programado dividida por el valor programado y multiplicado por cien. El resultado es de un error del 2,2 %.

También se puede ver que los datos de velocidad de los medidores de par de motor y freno, a excepción del ruido, se solapan prácticamente. Solo se aprecia alguna pequeña diferencia en la parte final del ensayo cuando se queda a cero. A primera vista podría parecer que el error que se estaba buscando subsanar aún permanece. Para sacar unas mejores conclusiones se realiza una ampliación sobre esta zona, la cual se muestra en la figura 3-17.

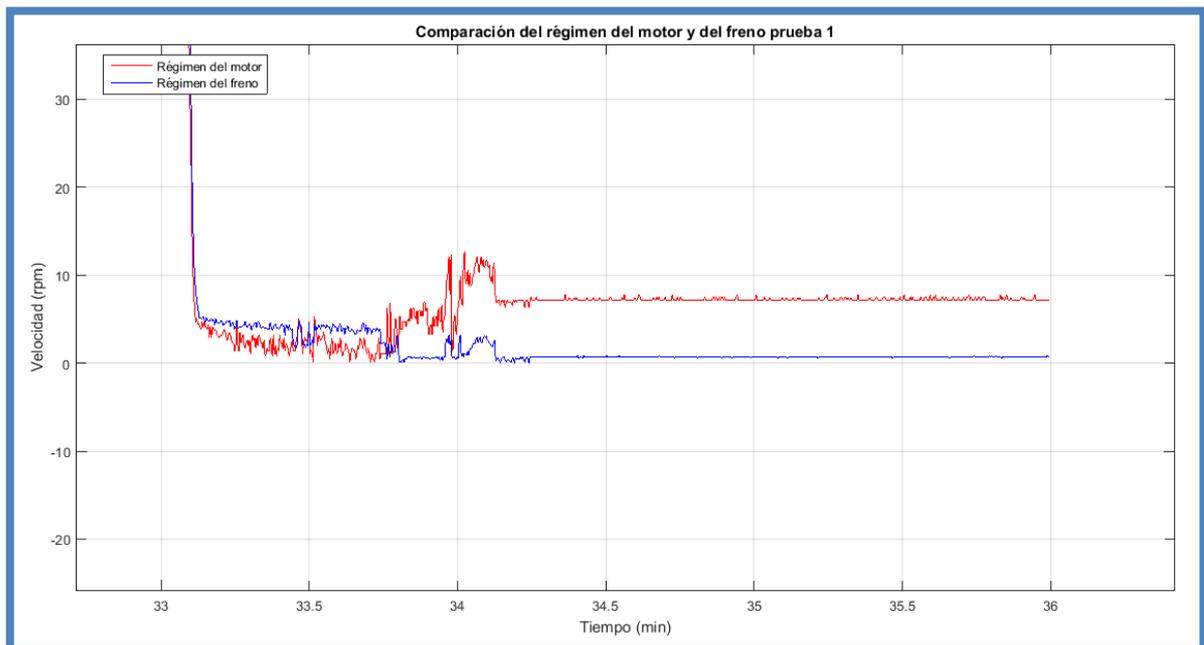


Figura 3-17. Ampliación de la figura 3-16 en la zona final correspondiente a velocidad nula.

Como se puede ver en la figura 3-17, ninguno de los dos valores llega al cero ordenado por el software al motor. Pero ninguno de ellos supera la lectura de 10 rpm por lo que este error es perfectamente explicable con el ruido que afecta a la señal. Dentro de este error, la diferencia entre los valores de motor y freno se puede explicar por la diferencia de características de los medidores de par. Recurriendo de nuevo al error relativo referido al rango de medida de cada medidor de par se comprueba que ambos son muy pequeños. Este error se calcula como la diferencia entre el valor obtenido y el valor teórico por el valor máximo que puede detectar el medidor de par y multiplicado por cien. Concretamente un 0,1056 % para el medidor de par del motor y un 0,0625 % en el caso del medidor de par del freno.

En la figura 3-17 también se puede ver una pequeña subida de la velocidad cuando ya se debería haber estabilizado la señal tras pasar el transitorio. Esta subida se debe al efecto que produce el inactivo del motor y del freno. Ambos son motores de una potencia enorme e influyen en la señal recogida por los medidores de par.

Una vez analizada esta primera prueba se pasa a las dos siguientes. En la figura 3-18 se representan los datos de la segunda prueba y en la figura 3-19 se representan los datos registrados en la tercera prueba.

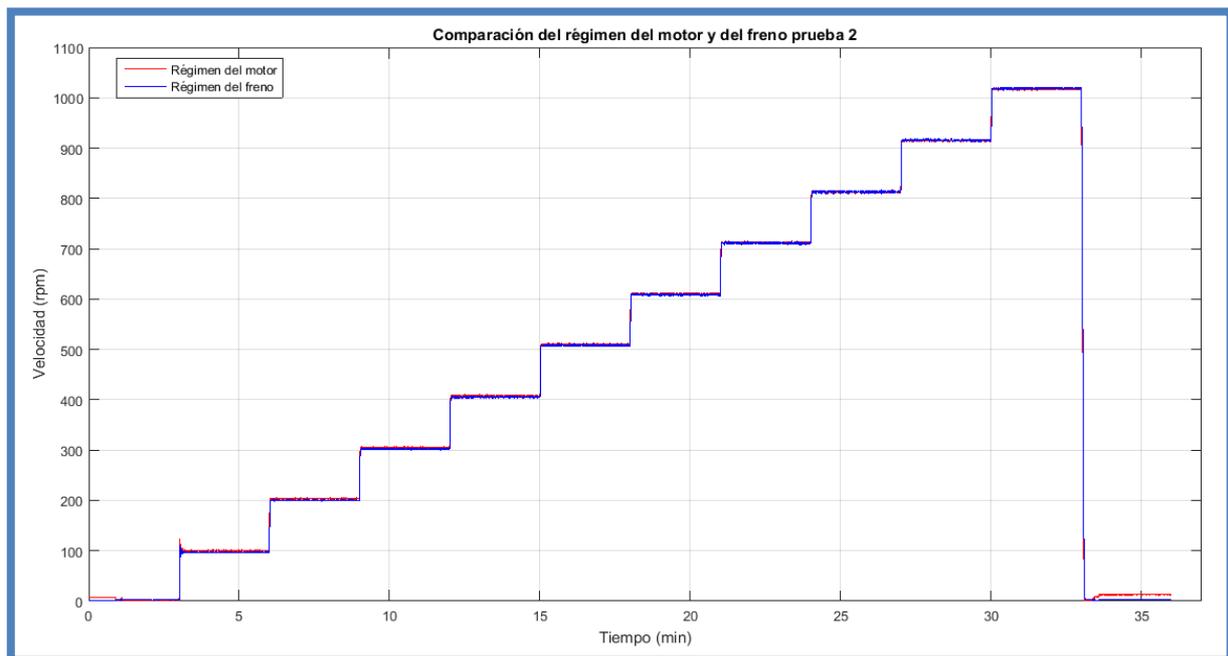


Figura 3-18. Registro de velocidades del segundo ensayo.

Las conclusiones que se pueden sacar de esta segunda prueba que se muestra en la figura 3-18 son muy parecidas a las de la primera prueba. Solo cabe añadir que las diferencias entre los medidores de par del motor y del freno son también visibles al comenzar el ensayo. También se puede detectar el efecto de encender el motor y el freno, que no solo tiene lugar durante el inactivo y que no era tan palpable en el primer ensayo.

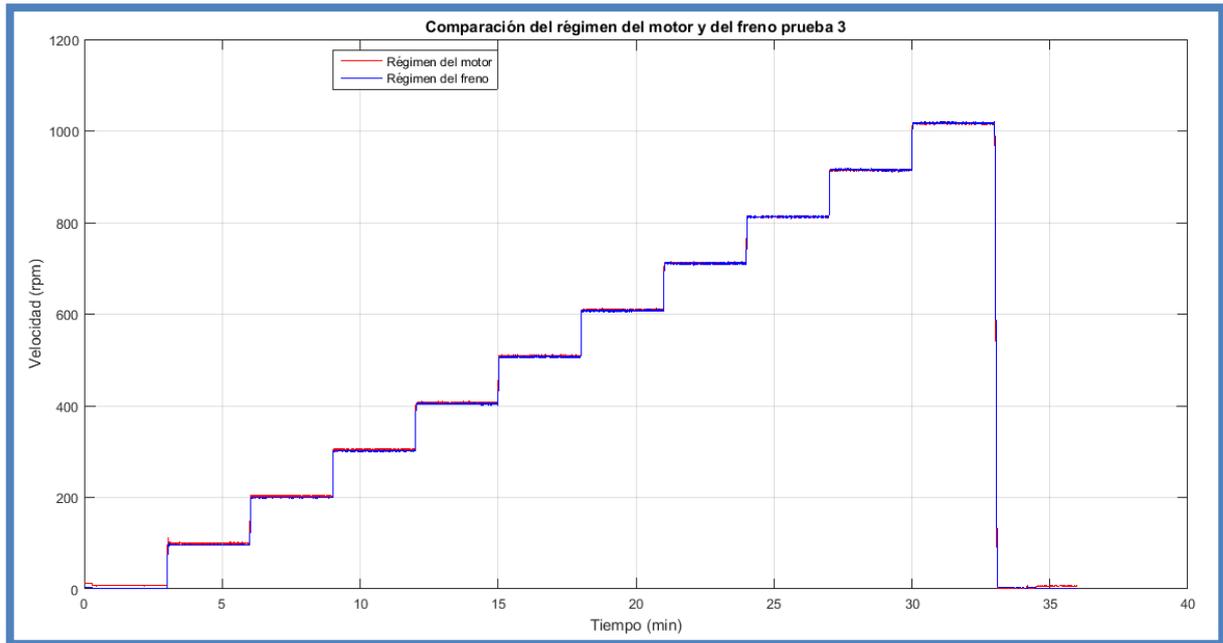


Figura 3-19. Registro de velocidades del tercer ensayo.

El análisis de esta tercera prueba que se muestra en la figura 3-19 es idéntico al realizado en las anteriores pruebas.

### 3.8.1.2 Resultados de velocidad en régimen permanente

Para seguir la comparación entre los medidores de par se procede a representar estos mismos datos de una forma donde la comparación sea aún más evidente. Se representan los datos de velocidad del motor frente a los del freno. Como ambos valores deben coincidir se deberían encontrar todos sobre la bisectriz de la gráfica. En la figura 3-20 se muestra esta representación para la primera prueba, en la figura 3-21 para la segunda prueba y en la 3-22 para la tercera prueba. Además, para este análisis se han seleccionado los datos en régimen permanente porque la forma de recoger los datos en el transitorio es diferente en cada medidor de par y esta diferencia ya es conocida.

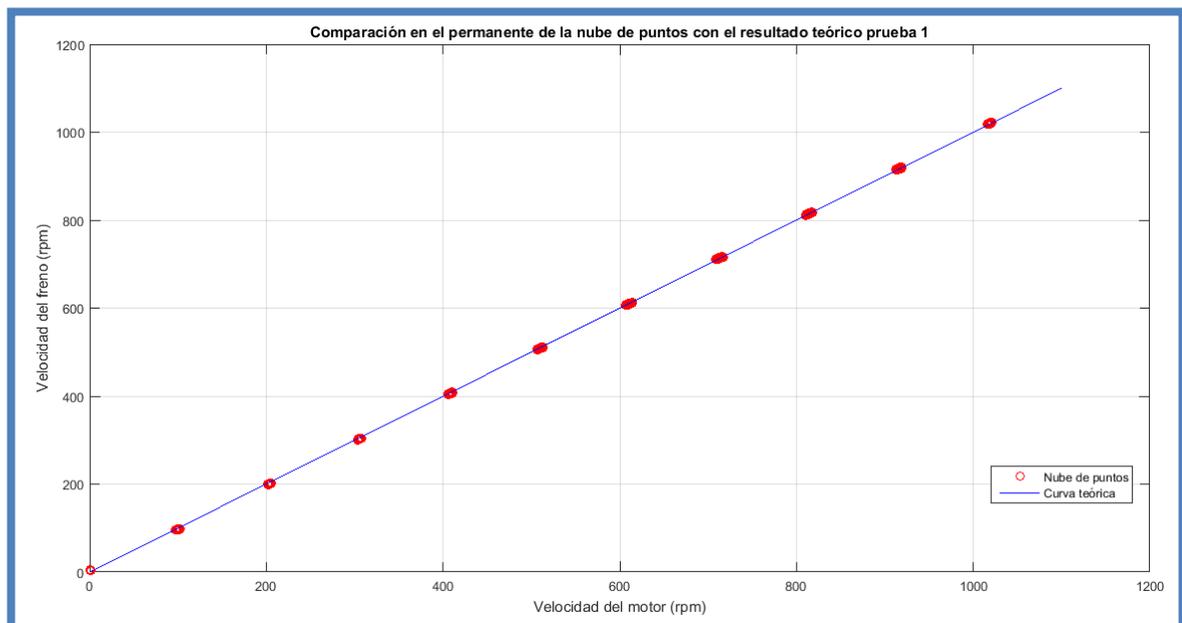


Figura 3-20. Verificación de los resultados del primer ensayo en régimen permanente.

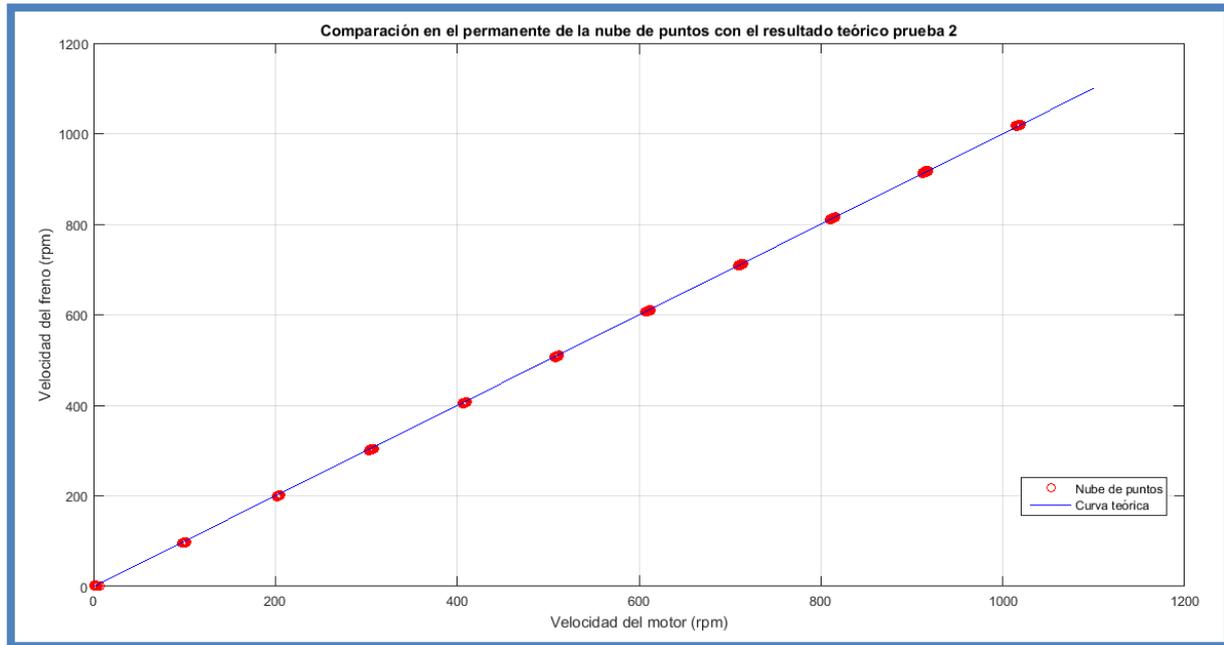


Figura 3-21. Verificación de los resultados del segundo ensayo en régimen permanente.

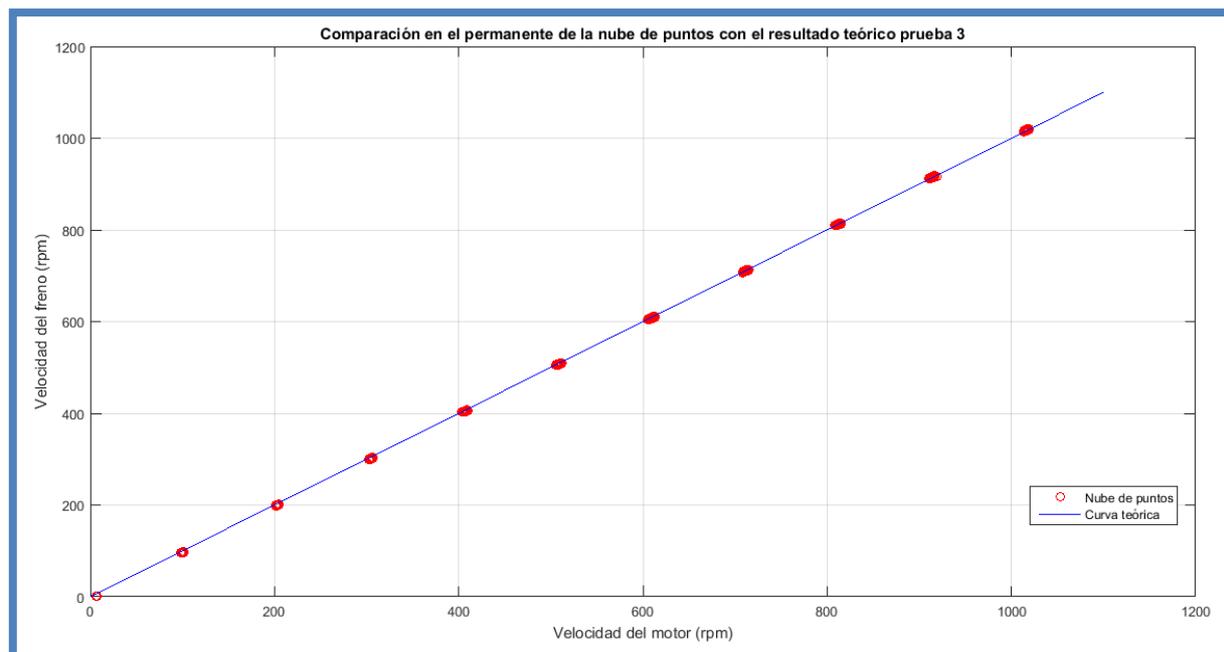


Figura 3-22. Verificación de los resultados del tercer ensayo en régimen permanente.

Como se puede ver en todas las pruebas (figuras 3-20, 3-21 y 3-22) los resultados experimentales se ajustan muy bien a la curva teórica. Esto indica que las hipótesis realizadas hasta el momento estaban bien fundamentadas ya que tienen una correspondencia en los resultados reales.

### 3.8.1.3 Resultados de velocidad de los tres ensayos

Por último, para cerrar el estudio en velocidad de estos ensayos se van a superponer los resultados de las tres pruebas para comprobar la correspondencia entre ellos. Hasta ahora el estudio se había limitado a probar la coincidencia entre los datos recogidos por los medidores de par del motor y del freno. En este caso se compararán los resultados del medidor de par del motor en los tres ensayos para confirmar su repetibilidad. Esta comparación se muestra en la figura 3-23. No es necesario hacer esto mismo con el freno, ya que se acaba de verificar que los

datos del motor y del freno coinciden en esta configuración.

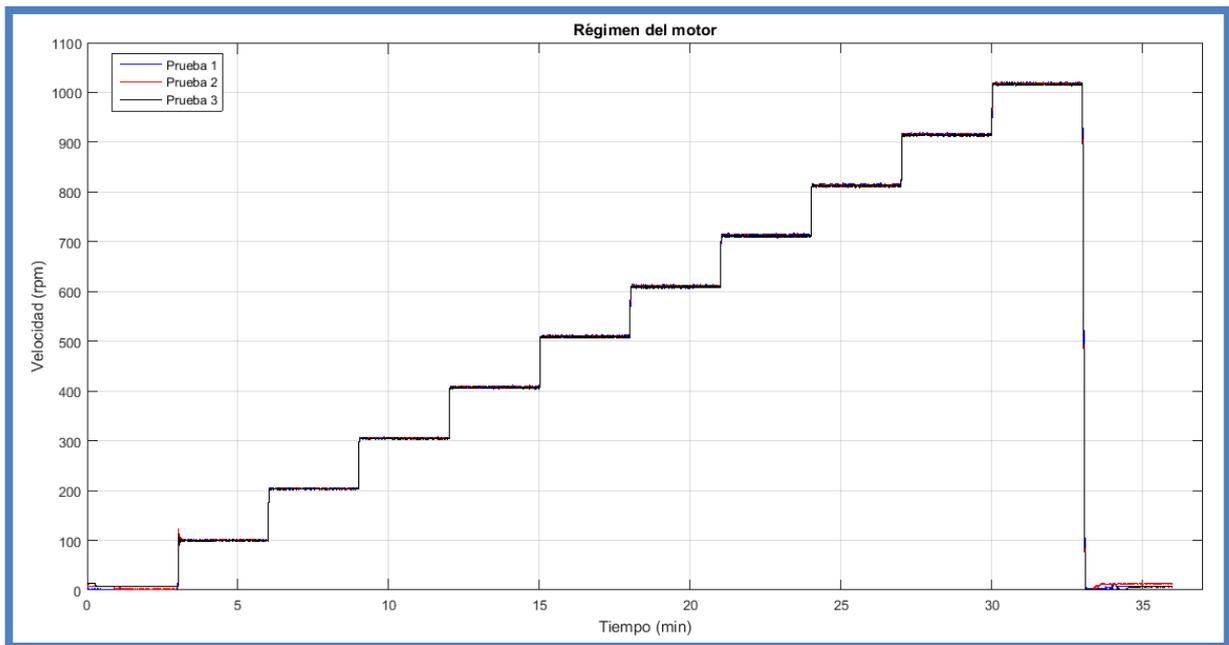


Figura 3-23. Registro de velocidades de los tres ensayos.

Como se puede ver en la figura 3-23 los datos se solapan prácticamente a excepción de las zonas de velocidad nula. Estas dos zonas se representan de forma ampliada en las figuras 3-24 y 3-25. La discrepancia en estas zonas se explica en parte porque el instante en que se encienden y se apagan el motor y el freno en cada prueba es diferente. Se recuerda que esta acción no se puede automatizar y se tiene que realizar manualmente, por lo que es imposible que coincidan en el mismo instante de tiempo en los tres ensayos.

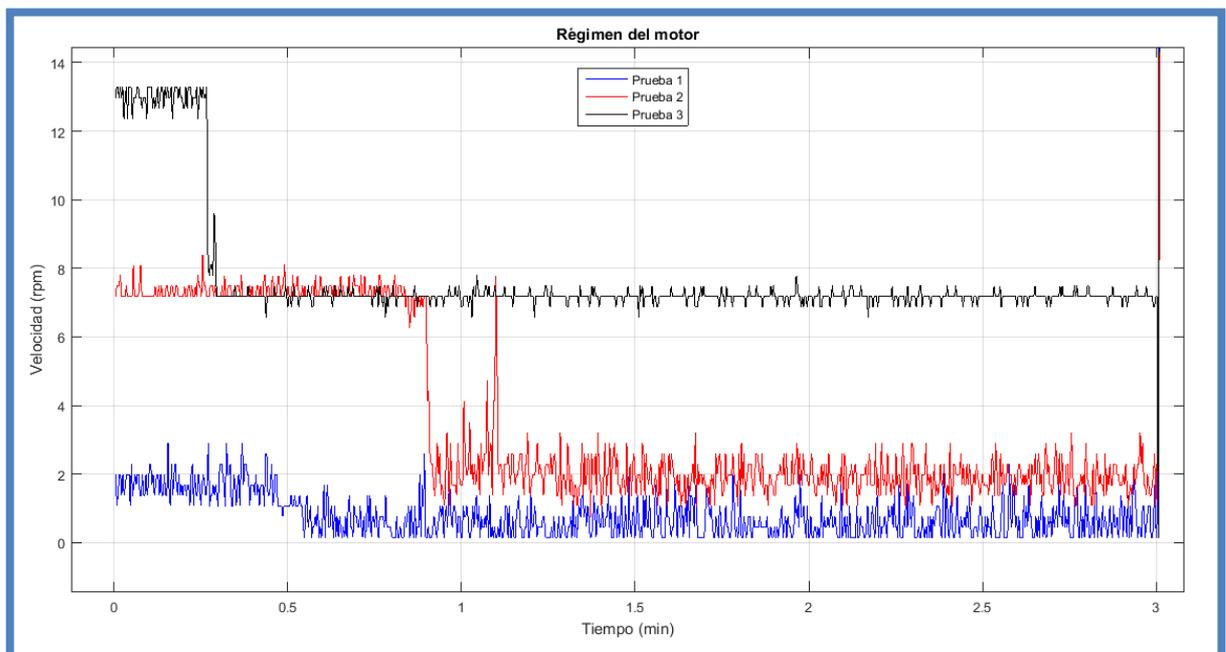


Figura 3-24. Ampliación de la figura 3-23 en la zona inicial correspondiente a velocidad nula.

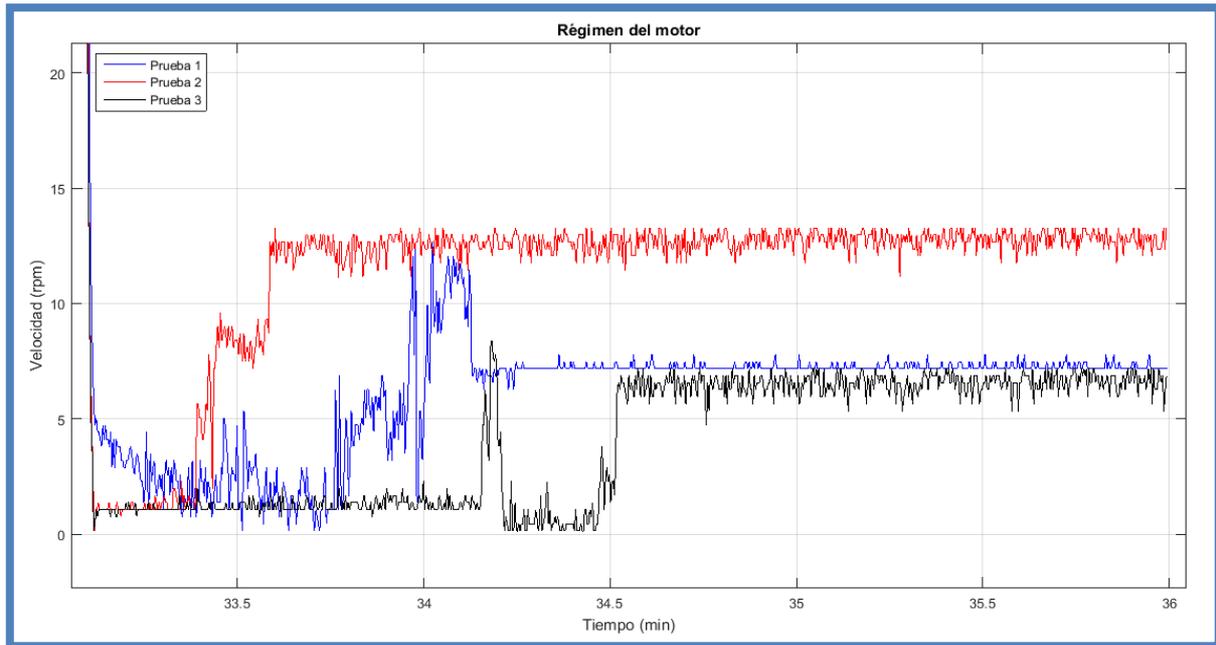


Figura 3-25. Ampliación de la figura 3-23 en la zona final correspondiente a velocidad nula.

A pesar de esto, hay una discrepancia entre los tres ensayos en estas zonas, pero en ningún caso alcanzan un valor superior a las 14 rpm. La razón de esta diferencia parece radicar en las interferencias electromagnéticas que introducen ruido en la señal recogida por los medidores de par. A pesar del aislamiento de los cables que conectan los medidores de par con el sistema de adquisición de datos, es imposible aislar el sistema completamente.

Pero este error, una vez conocido y estudiado porcentualmente con el rango de medida carece de importancia (0,1107 %), ya que en pocas ocasiones el ensayo se va a realizar en un régimen de velocidades tan bajo. Y los resultados en el resto del ensayo son aceptables. Por tanto, el banco de ensayos está preparado para ensayar otros elementos en velocidades.

#### 3.8.1.4 Resultados de par

El siguiente paso es realizar un análisis del par medido por los medidores de par. Se va a seguir un proceso similar al empleado en el análisis de velocidades. En primer lugar, se comprobará que los valores registrados por ambos medidores de par coinciden en cada ensayo y posteriormente que los datos de los tres ensayos también coinciden.

Al igual que en la cuestión de las velocidades, al estar los medidores de par unidos por la junta cardán que fija la relación de transmisión a uno, los valores de par medidos por ambos deben coincidir.

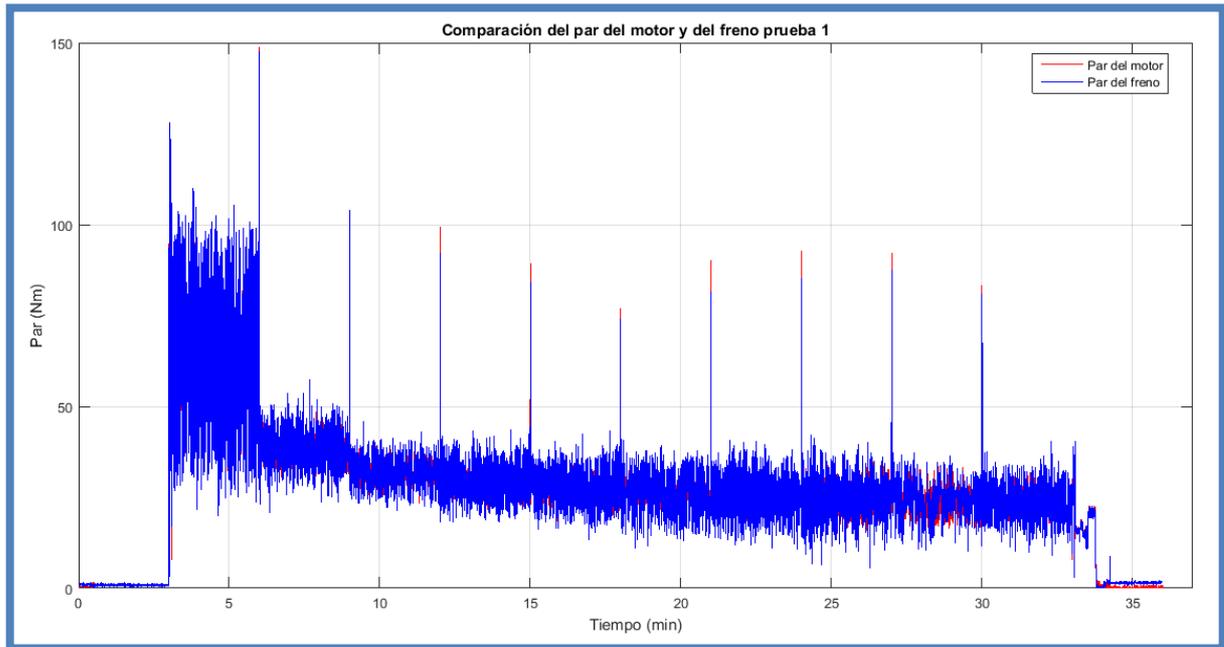


Figura 3-26. Registro de los pares en el primer ensayo.

En esta primera gráfica de la figura 3-26 se produce un efecto que puede llevar a error. Parece que la amplitud de la banda producida por el ruido es mayor que en el caso de las velocidades, pero es un efecto debido a la escala de cada gráfica. Si se recuerda la figura 3-23 el valor máximo de la velocidad se encontraba ligeramente por encima de 1000 rpm mientras que en el caso del par el valor máximo no llega a 150 Nm.

Como se puede ver, los valores de los medidores de par coinciden bastante bien, salvo en el caso del último tramo de velocidad y par nulos, al igual que ocurría en el caso de las velocidades. Este último tramo se ha representado de forma ampliada en la figura 3-27. Al igual que en el tema de las velocidades y como se puede detectar en la figura 3-27, la diferencia es muy pequeña y porcentualmente a la escala de medidas de cada instrumento de medida el error no es significativo (un 0,1451 % para el motor y un 0,1800 % para el freno).

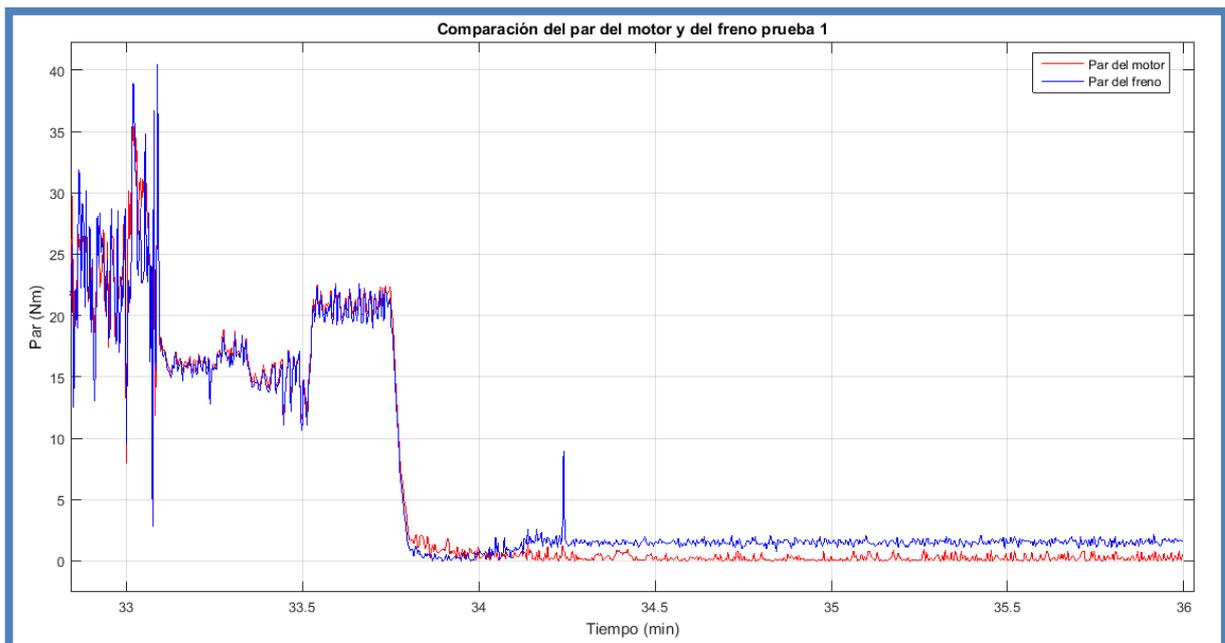


Figura 3-27. Ampliación de la figura 3-26 en la zona final correspondiente a velocidad nula.

También se puede observar en la figura 3-27 como cambia el valor del par a causa del inactivo del freno y el motor de igual forma que lo hacía con las velocidades.

Se puede ver que el valor del par durante el movimiento se mantiene, en media, aproximadamente constante. Sin embargo, se puede apreciar una diferencia tanto en el valor de los picos como en el valor medio entre la primera zona y las posteriores. Si se recuerda, esta primera zona corresponde a la velocidad de 100 rpm.

En esta configuración del ensayo, el par resistente es aproximadamente constante en todo momento, ya que la carga del freno permanece constantemente en un valor nulo. Sin embargo, se debe señalar que el conjunto de elementos del banco tiene un peso elevado y ejercen un par resistente. Es fácil deducir que, a medida que la velocidad del motor vaya aumentando el par resistente será más fácil de vencer debido a la inercia.

Además, se detecta un pico de par que se corresponde con cada cambio de velocidad. Este pico es debido al momento de inercia, ya que para pasar de una velocidad a otra se produce una aceleración angular ( $M_I = I \cdot \alpha$ ). Para comprobar que se cumple todo lo que se acaba de explicar, se va a representar conjuntamente la señal de velocidad y de par recogida por el medidor de par del motor en la figura 3-28.

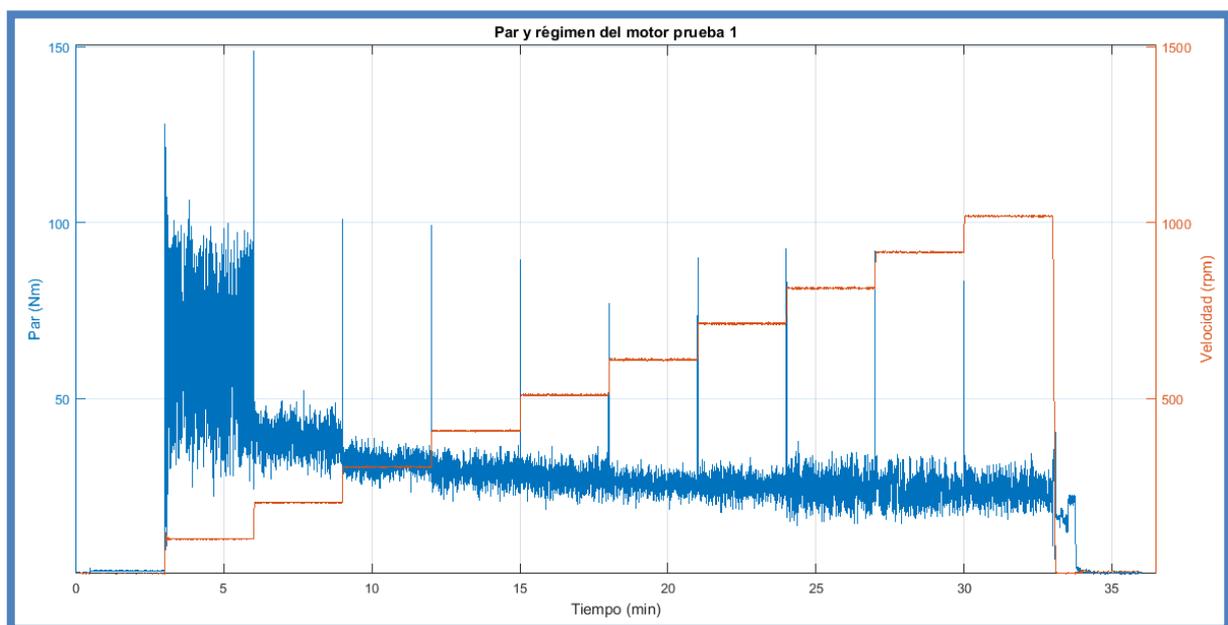


Figura 3-28. Registro de velocidades y pares del primer ensayo.

Una vez analizada la primera prueba, se pasa a analizar las otras dos pruebas para corroborar que ocurren los mismos fenómenos que se han descrito y explicado, y seguir con la verificación de la correspondencia entre los datos del motor y del freno. En la figura 3-29 se muestra la representación gráfica de los pares de la segunda prueba y de igual forma en la figura 3-30 se muestran los registros de la tercera prueba.

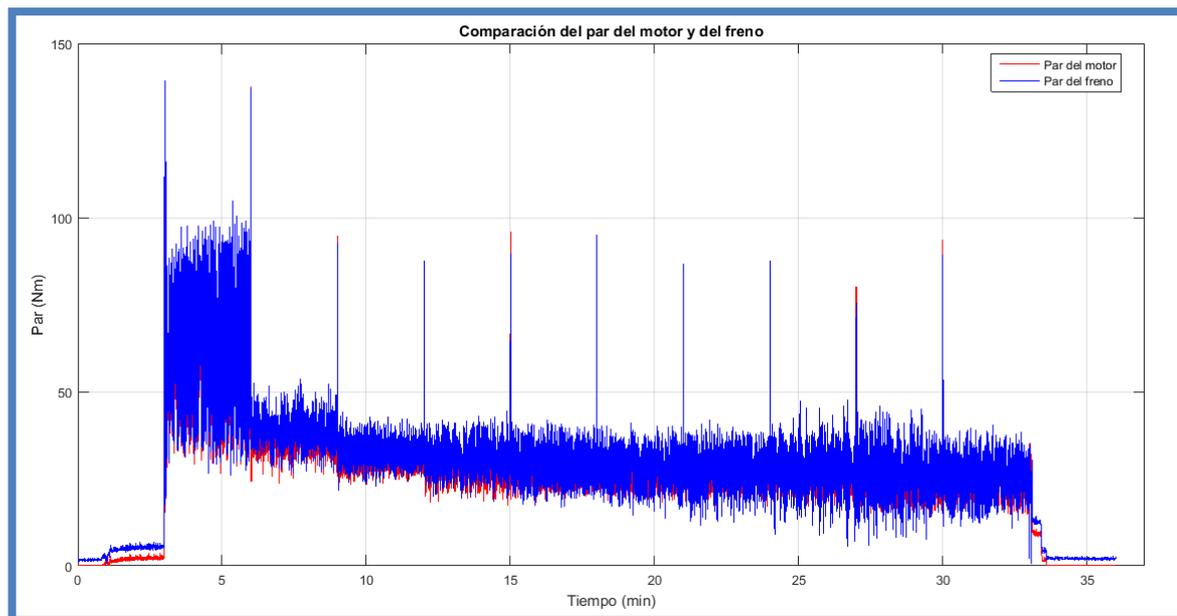


Figura 3-29. Registro de los pares en el segundo ensayo.

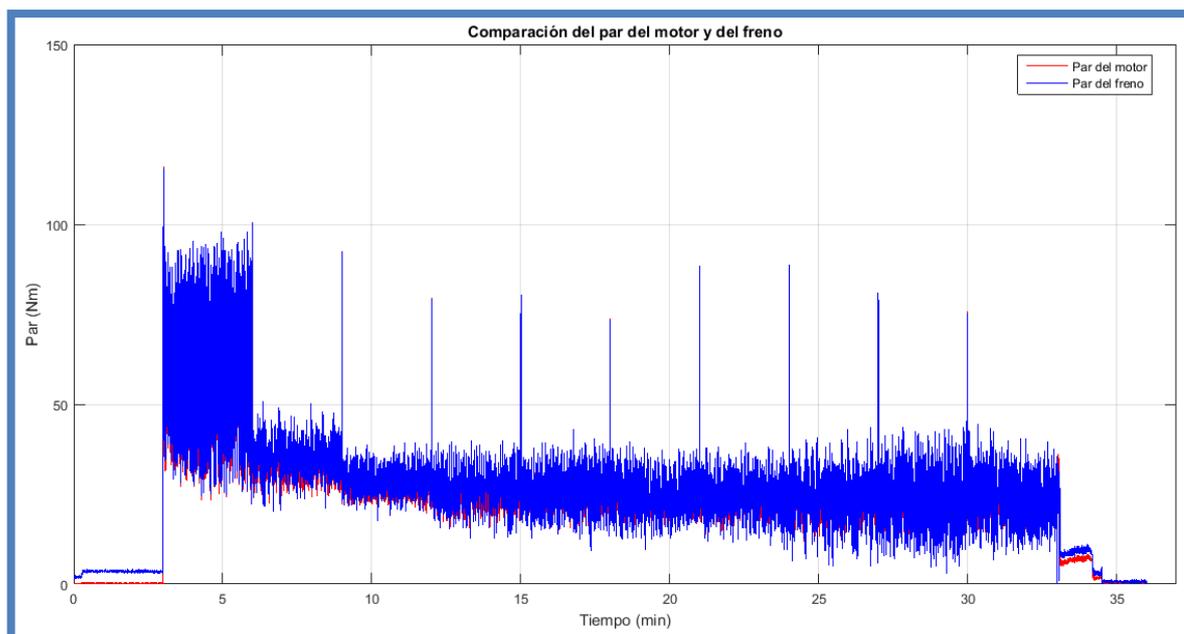


Figura 3-30. Registro de los pares en el tercer ensayo.

De nuevo se puede hacer una analogía entre el caso de las velocidades y el par, ya que en estas dos pruebas se pueden detectar diferencias entre los valores recogidos por el medidor del motor y el del freno en la primera parte del ensayo cuando el motor aún no ha empezado a girar. Las causas de estas diferencias son las mismas que en el caso de las velocidades.

En este punto del estudio de los datos recogidos del par se podría realizar una representación similar a la realizada con las velocidades en la que se muestran enfrentados los valores del par del motor y del par de freno y comprobar si estos se encuentran sobre la curva teórica que sería la bisectriz. Sin embargo, como se ha podido ver en las figuras 3-26, 3-29 y 3-30, al tener un rango de valores mucho menor que solo llega a 150 Nm el ruido de la señal será mucho más acusado y los resultados no serán tan claros. Por ello se descarta realizar esta representación.

A continuación, se pasa a representar los registros del medidor de par del motor. Nuevamente no es necesario hacer esto mismo con el freno, ya que se acaba de verificar que los datos del motor y del freno son semejantes en esta configuración.

### 3.8.1.5 Resultados de par de los tres ensayos

En la figura 2-31 se puede ver que los tres experimentos proporcionan unos resultados de par muy similares. Si se abstrae de las oscilaciones que sufre la señal en torno al valor medio se puede detectar que hay una ligera diferencia entre los tres ensayos durante el movimiento del motor, no obstante, no parece reseñable en este punto de este estudio.

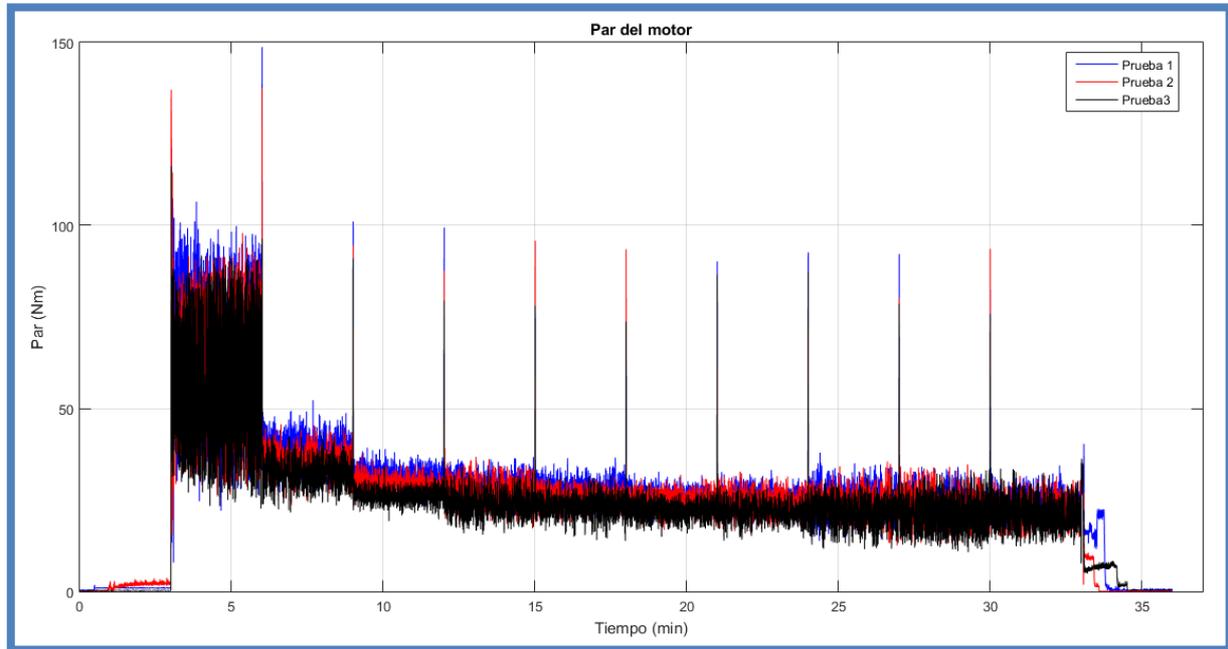


Figura 3-31. Registro de pares de los tres ensayos.

Asimismo, se puede volver a ver en la figura 3-31 las diferencias entre los tres ensayos cuando el motor está parado tanto en la zona inicial del ensayo como en la parte final. Estas diferencias, como se explicó para el caso de las velocidades en el apartado 3.8.1.1, están causadas por la influencia del activo y inactivo del motor y del freno. Estos motores tienen una gran potencia y su encendido o inactivo produce una interferencia electromagnética que es recogida por los medidores de par. Lo que si se puede verificar es que los valores con todos los elementos inactivos son prácticamente cero, por lo que se ha conseguido corregir el error que se ha descrito al comienzo de este capítulo.

### 3.8.2 Ensayo con carga de freno

Para finalizar este capítulo se va a realizar un experimento donde se va a modificar no solo la velocidad del motor si no también la carga del freno. El objetivo de este ensayo es seguir relacionando los datos recogidos por los dos medidores de par y que se reproduce adecuadamente las ordenes que se prescriben al freno. Para ello se va a seguir el siguiente procedimiento durante el ensayo representado gráficamente en la figura 3-32:

- En primer lugar, se deja unos minutos para encender manualmente el motor y el freno.
- Posteriormente se eleva la velocidad del freno linealmente hasta alcanzar la velocidad de 100 rpm.
- Una vez alcanzada esta velocidad se va aumentando la carga del freno linealmente entre 0% y 17% con paradas en 5%, 10% y 15%. En este paso solo se alcanza el 15% de la carga del freno.
- Una vez se ha mantenido suficiente tiempo el último tramo al 17% de carga de freno, ésta se baja hasta el 0% linealmente.
- Una vez hecho esto, se eleva la velocidad hasta 200 rpm linealmente y se repiten los dos puntos anteriores.
- Por último, se bajan a cero tanto la velocidad como la carga del freno y se deja unos minutos para apagar el motor y el freno.

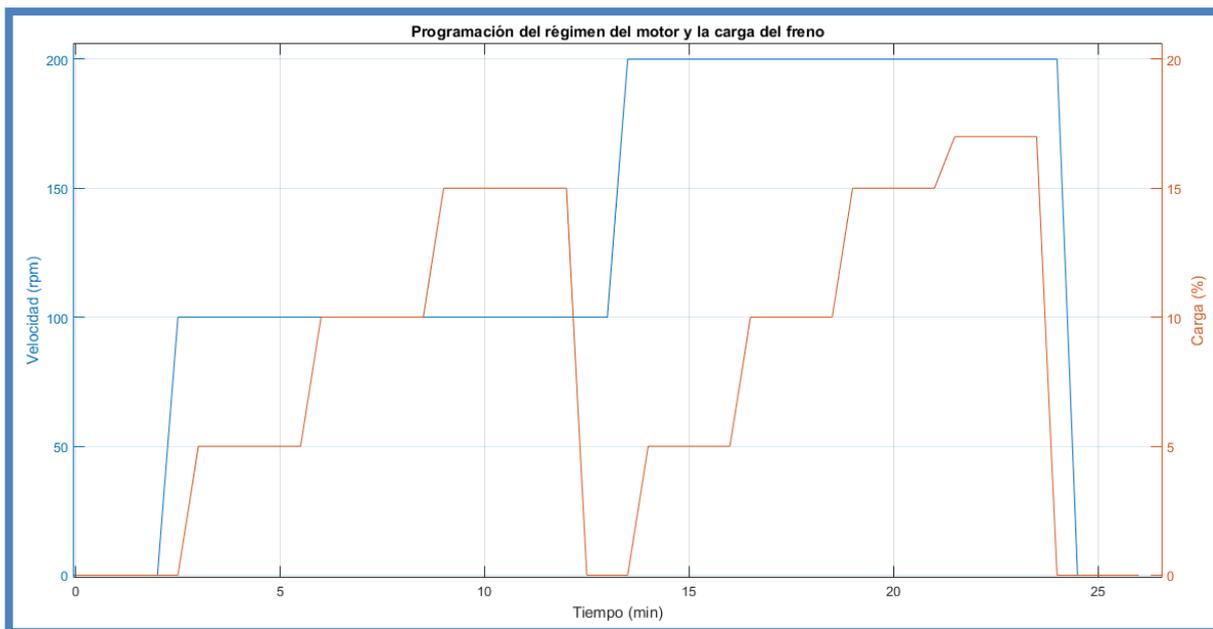


Figura 3-32. Representación de la entrada programada para el motor y el freno.

Hubo que repetir en varias ocasiones este experimento ya que, a priori, no se conocía el valor que alcanzaría el par al subir la carga del freno. Esto hizo que se activase en varias ocasiones la alarma del par. Al estar el conjunto conectado por la junta, el nivel de alarma más bajo es el que limitaba el ensayo, ya que todo el conjunto estaba sometido al mismo par, no había diferencias entre motor y freno. El elemento que limitaba era el medidor de par del motor que soporta un par de calibración de 587,4 Nm y para protegerlo se estableció un límite de 450 Nm que diera bastante margen. La carga del freno se fue variando por ensayo y error hasta alcanzar el óptimo en el 17%.

Una vez realizada esta explicación, se procede a presentar la contrastación de los datos recogidos por los medidores de par en velocidad y en par. Para ello se representan gráficamente los datos de velocidad del motor y del freno en la figura 3-33, los valores de las velocidades en régimen permanente en la figura 3-34 y los pares obtenidos en el motor y en el freno en la figura 3-35:

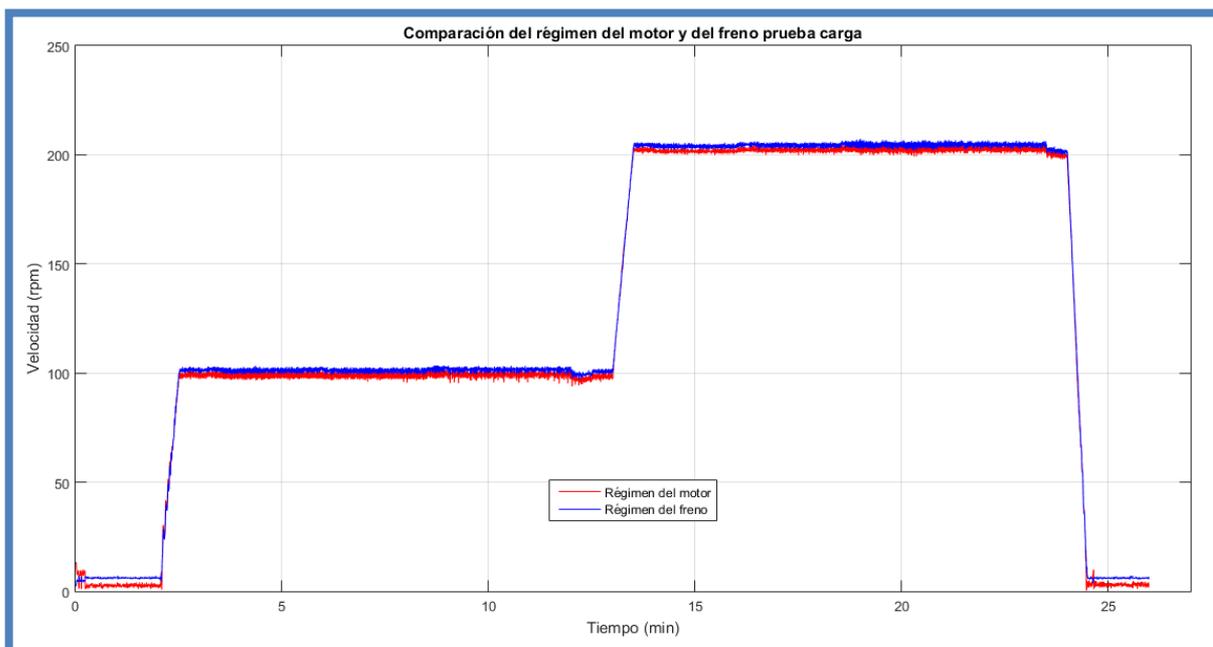


Figura 3-33. Registro de velocidades en el ensayo con carga de freno.

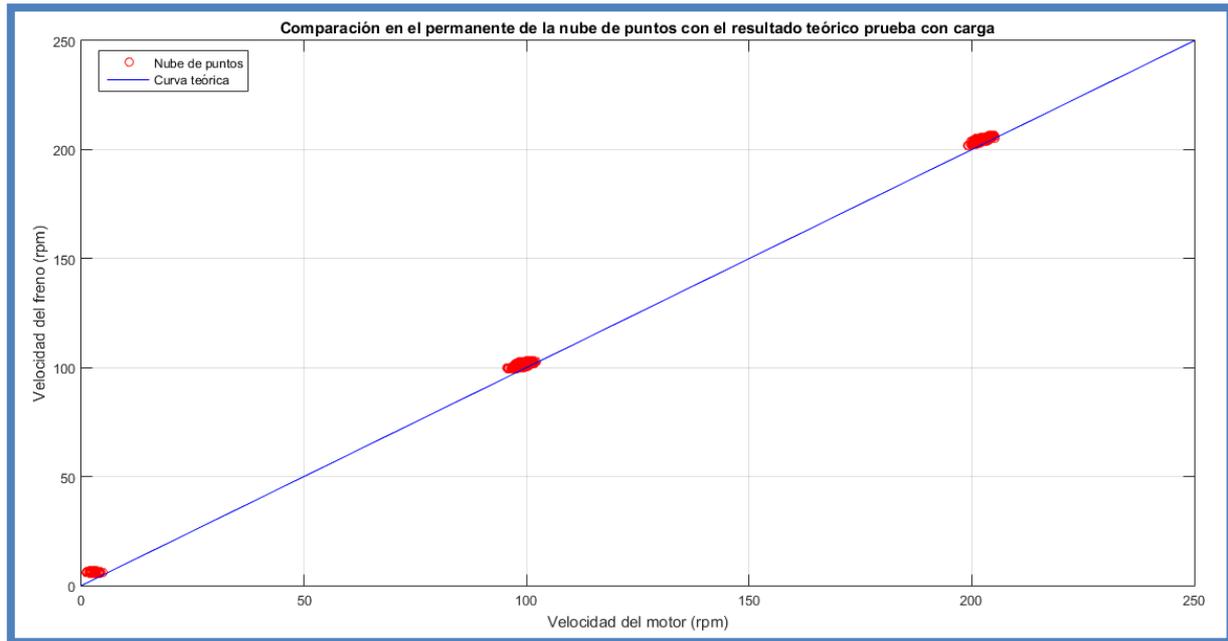


Figura 3-34. Verificación de los datos de velocidades en régimen permanente del ensayo con carga de freno.

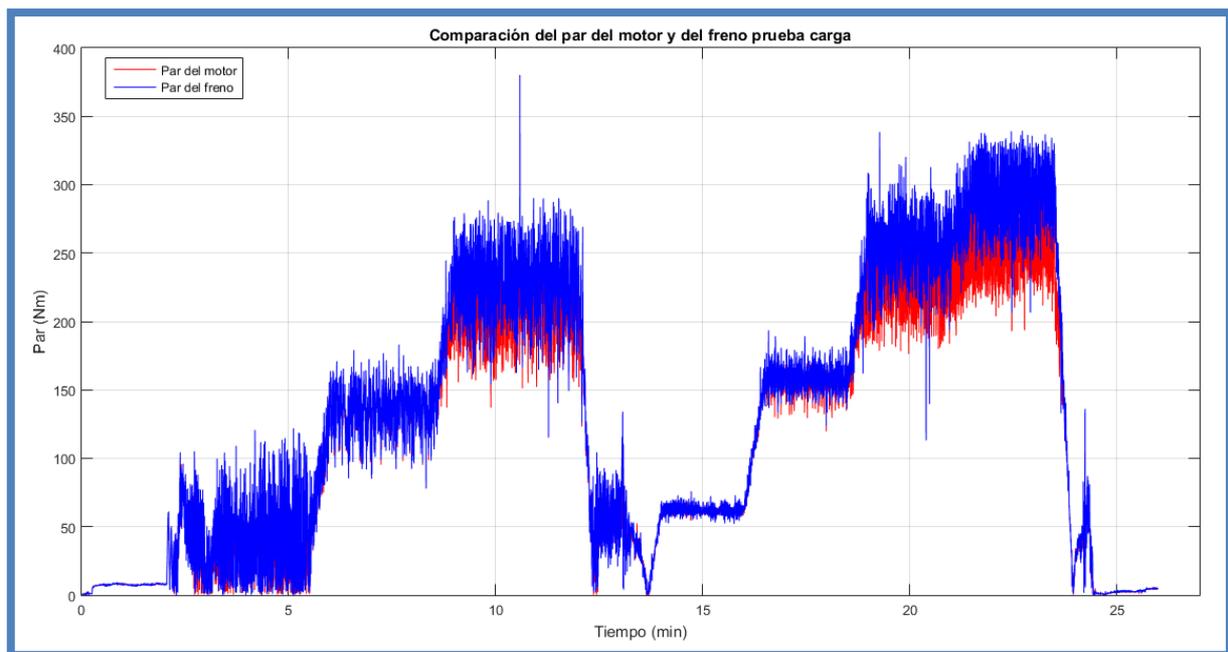


Figura 3-35. Registro de los pares en el ensayo con carga de freno.

Como se puede percibir hay una ligera diferencia entre los datos recogidos por los dos medidores de par; en la figura 3-34 que representa la velocidad en régimen permanente, que se observa esta desviación es muy pequeña y se pueden dar por buenos los resultados obtenidos durante la calibración.

# 4 CAJA DE CAMBIOS CVT INERCIAL

Una vez realizada la calibración y conocido el comportamiento de los instrumentos de medida se pasa al capítulo principal de este proyecto, el estudio de una caja de cambios de relación de transmisión continuamente variable (CVT). El estudio se va a llevar a cabo con una caja de cambios CVT inercial que fue diseñada en el departamento de transportes de la escuela de ingeniería. El objetivo principal de este estudio es conocer la influencia de una parte rectificadora que se instaló en la parte final de la CVT.

## 4.1 Descripción de la caja de cambios y su funcionamiento

En primer lugar, se va a describir de la forma más breve posible los elementos que componen la caja de cambios y el funcionamiento de la misma, ya que es necesario para la buena comprensión del resto de apartados. La mayor parte de la información de este apartado se ha obtenido de los documentos presentes en las referencias [1], [2] y [3]. En ellas se puede encontrar una explicación más detallada de los componentes y el funcionamiento de la CVT.

La caja de cambios consta de tres partes principales:

- Un mecanismo de entrada de cuatro barras, donde los ejes de entrada y salida se encuentran sujetos por dos soportes cada uno.
- Un conjunto de engranajes epicicloidales donde la corona funciona como elemento inercial de la CVT que realiza las tareas del convertidor de par.
- Un sistema de engranajes de dientes rectos que forman la rectificación que se ha citado al comienzo de este capítulo.

En la figura 4-1 se puede ver un esquema simplificado del orden de cada una de estas partes en la CVT, mientras que en la figura 4-2 se identifica cada parte en una imagen del prototipo real.

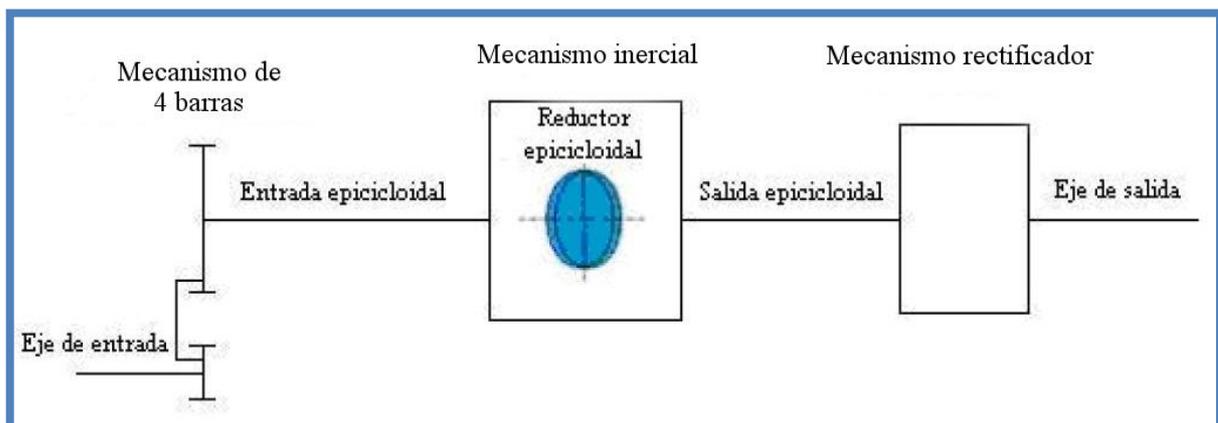


Figura 4-1. Esquema de la CVT. Imagen obtenida de la fuente [3], figura 2-1 en la página 3.

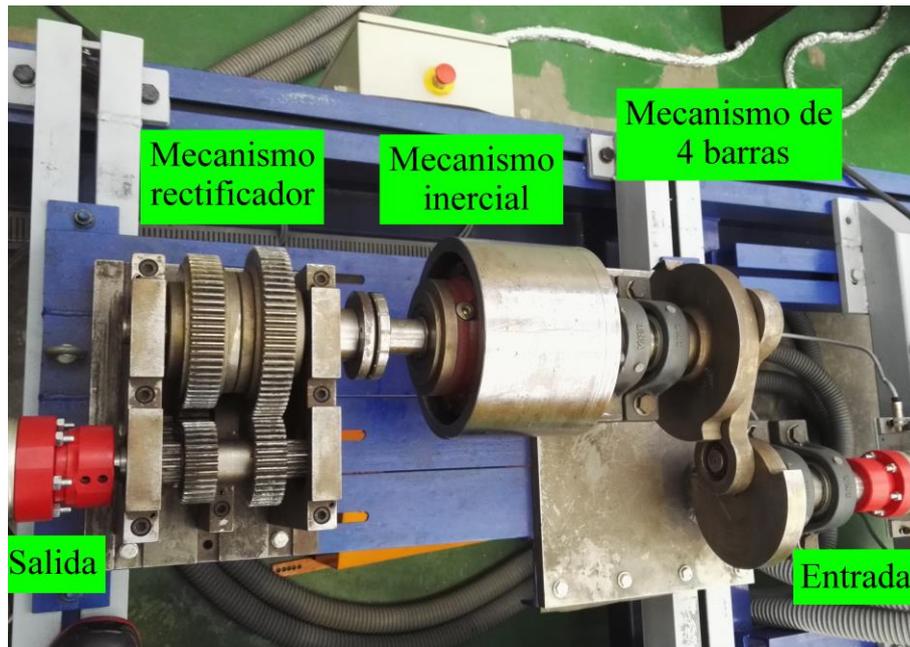


Figura 4-2. Imagen de la CVT con sus partes indicadas.

El mecanismo de 4 barras está diseñado para tener un comportamiento de biela-manivela-balancín. La barra de entrada da vueltas completas (manivela) y la barra de salida tiene un movimiento alternante (balancín). La manivela se conecta al motor que le transmite un movimiento en forma de giros completos, mientras que el balancín se conecta a la entrada del mecanismo inercial. De esta forma, a la entrada del mecanismo inercial se tiene una velocidad angular variable, es decir, se tienen aceleraciones angulares que darán lugar a momentos de inercia. La importancia de éstos se detallará en la descripción del funcionamiento del mecanismo inercial.

En la figura 4-3 y 4-4 se tienen imágenes del mecanismo de 4 barras, y en la figura 4-5 se tiene un esquema del funcionamiento del mismo. Como se puede ver en la figura 4-5, en el balancín se tienen velocidades angulares tanto positivas como negativas, lo que indica el movimiento alternante del balancín, una parte en el sentido de giro que se considera positivo y otra en el sentido opuesto. La figura 4-5 refleja la forma de la curva de velocidad simulada que tendría el balancín en función de uno de los parámetros del mecanismo de 4 barras, y solo pretende conseguir un mejor entendimiento del funcionamiento del mecanismo, por lo que deben apreciarse sus características cualitativas, como que el comportamiento no es totalmente simétrico.



Figura 4-3. Mecanismo de 4 barras.

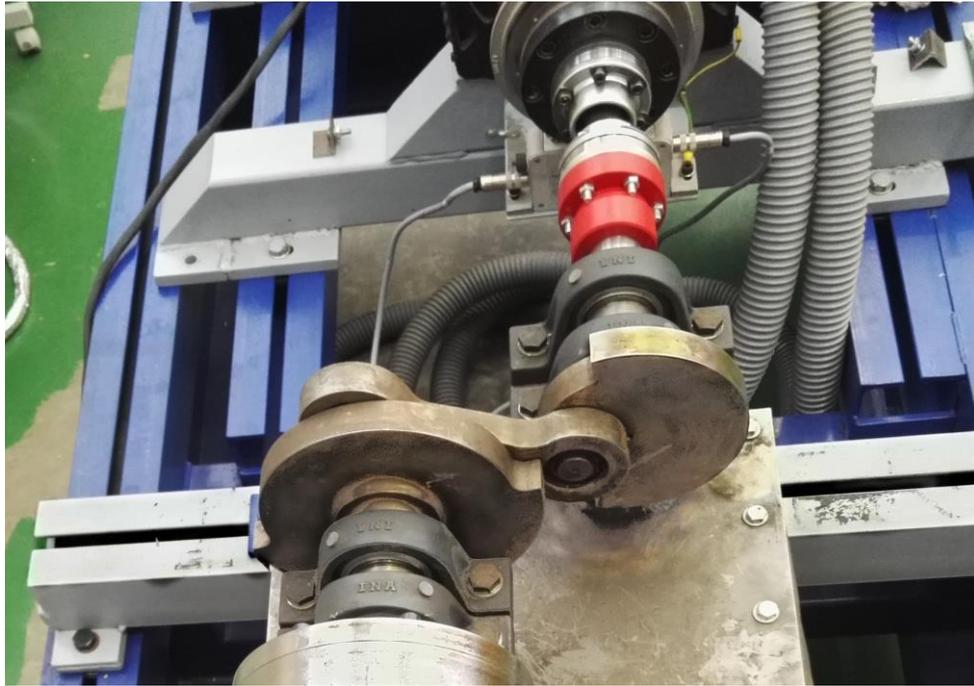


Figura 4-4. Mecanismo de 4 barras conectado a la brida de entrada.

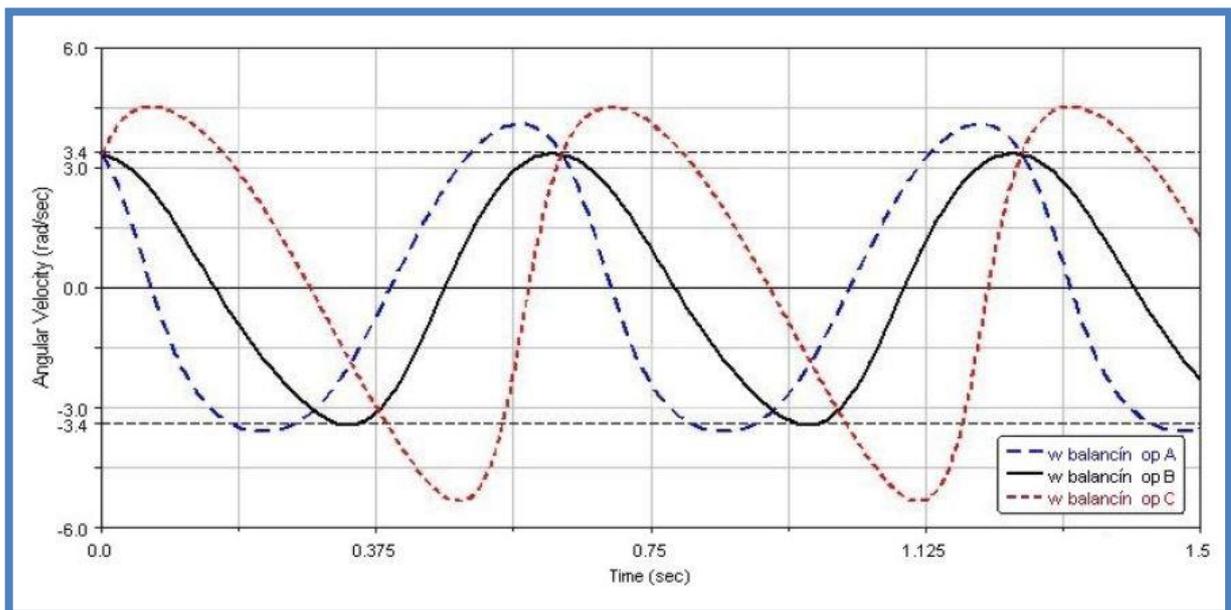


Figura 4-5. Esquema del funcionamiento del mecanismo de 4 barras. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-13 en la página 56.

El mecanismo inercial es un tren de engranajes epicicloidales en el que la corona es el elemento de inercia. Este tren de engranajes es el encargado de regular la relación de transmisión en función de los parámetros externos a la caja de cambios (este prototipo es una CVT de tipo dinámico) como la velocidad de entrada o el par resistente.

Cuando se produce una aceleración angular en el elemento de inercia, en este caso la corona, se produce un par de acuerdo con la ecuación  $M_I = I \cdot \alpha$ . Este par se transmite a través del tren epicicoidal hasta aplicarse sobre el planeta, el cual está unido a la salida del sistema inercial. Para que se produzca el par de inercia tiene que haber aceleraciones angulares, como se deduce de la ecuación anterior. Por ello la entrada del mecanismo inercial se encuentra conectada al balancín del sistema de 4 barras, el cual produce oscilaciones regulares al sistema modificando continuamente la aceleración del eje de entrada del mecanismo inercial, y permitiendo el correcto funcionamiento del sistema.

En las figura 4-6 y 4-7 muestran imágenes del mecanismo inercial. El tamaño de la masa de la corona imposibilita visualizar en detalle el tren epicicloidal que se encuentra en su interior.

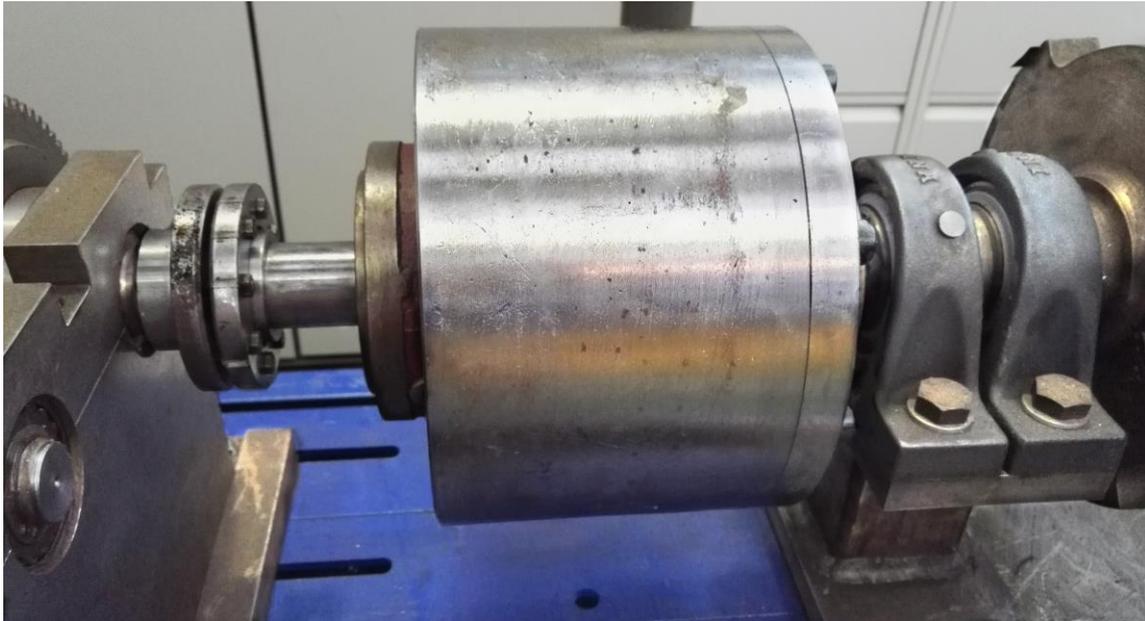


Figura 4-6. Mecanismo inercial.

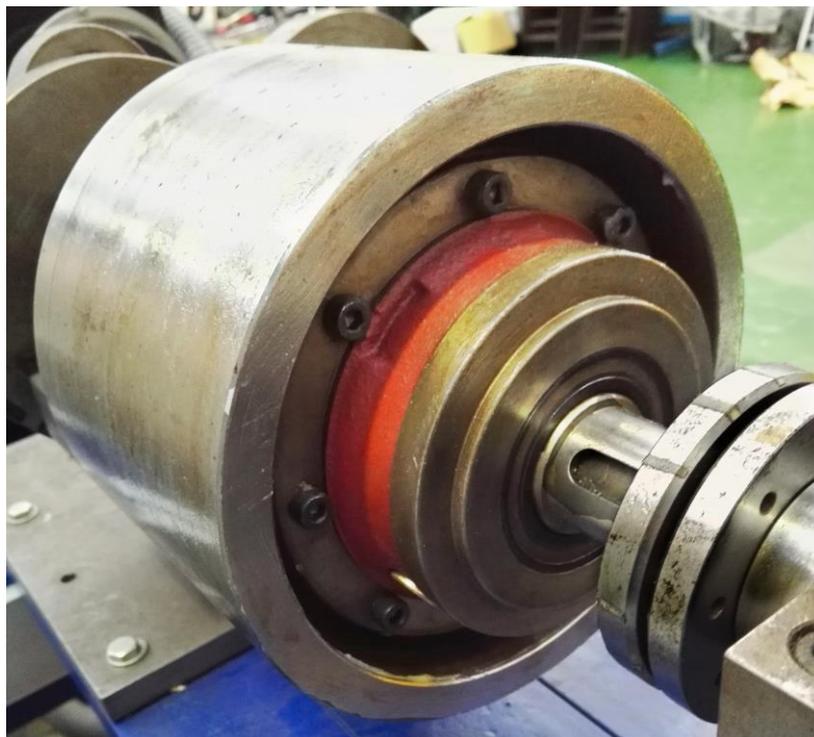


Figura 4-7. Mecanismo inercial en su parte posterior.

El par que se obtiene en el eje de salida del mecanismo inercial se comportará como el del eje de entrada, es decir, será un par oscilante de la misma frecuencia que el de entrada en el sistema inercial y multiplicado por un factor de amplificación o reducción. Pero para que un vehículo avance se necesita un par en un solo sentido, por lo que es necesario un mecanismo que permita lograr siempre el mismo sentido de giro a la salida de la CVT independientemente de cuál sea el sentido de giro en la entrada del mecanismo inercial, con el objetivo de que el vehículo avance en un único sentido. Este mecanismo es el sistema rectificador, o simplemente rectificador, que se muestra en la figura 4-8.

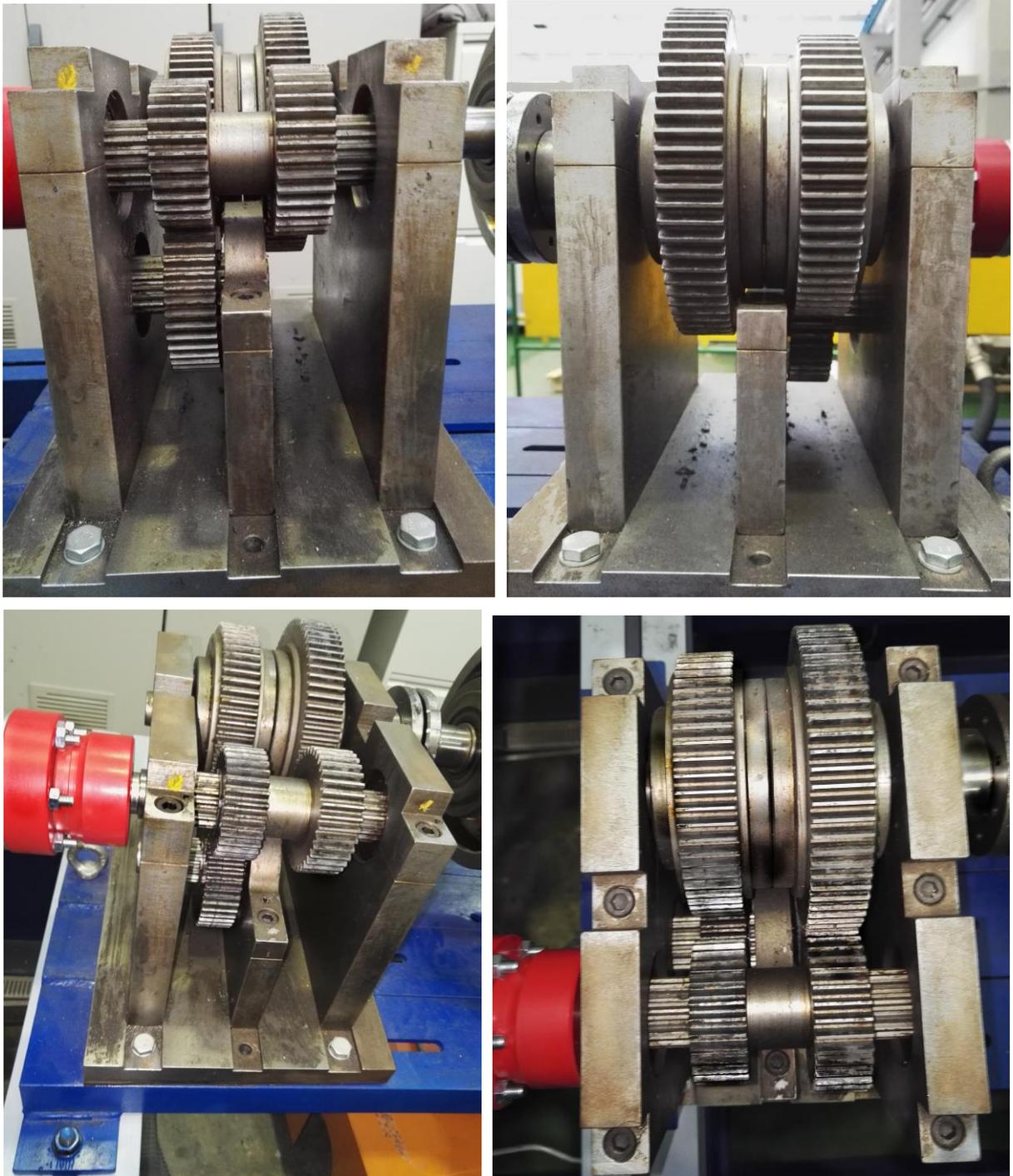


Figura 4-8. Rectificador desde perspectivas diferentes.

En la figura 4-9 se puede ver un esquema de los elementos del rectificador para la mejor comprensión de su funcionamiento. El funcionamiento del rectificador se basa en el principio de las ruedas libres. Una rueda libre es un dispositivo mecánico que permite transmitir par en un sentido y no en el contrario. En la figura 4-10 se puede ver un esquema de como funcionan internamente las ruedas libres. Si estas ruedas se combinan y se colocan de la manera adecuada se puede lograr siempre el mismo sentido de giro a la salida, como se aprecia en la figura 4-9.

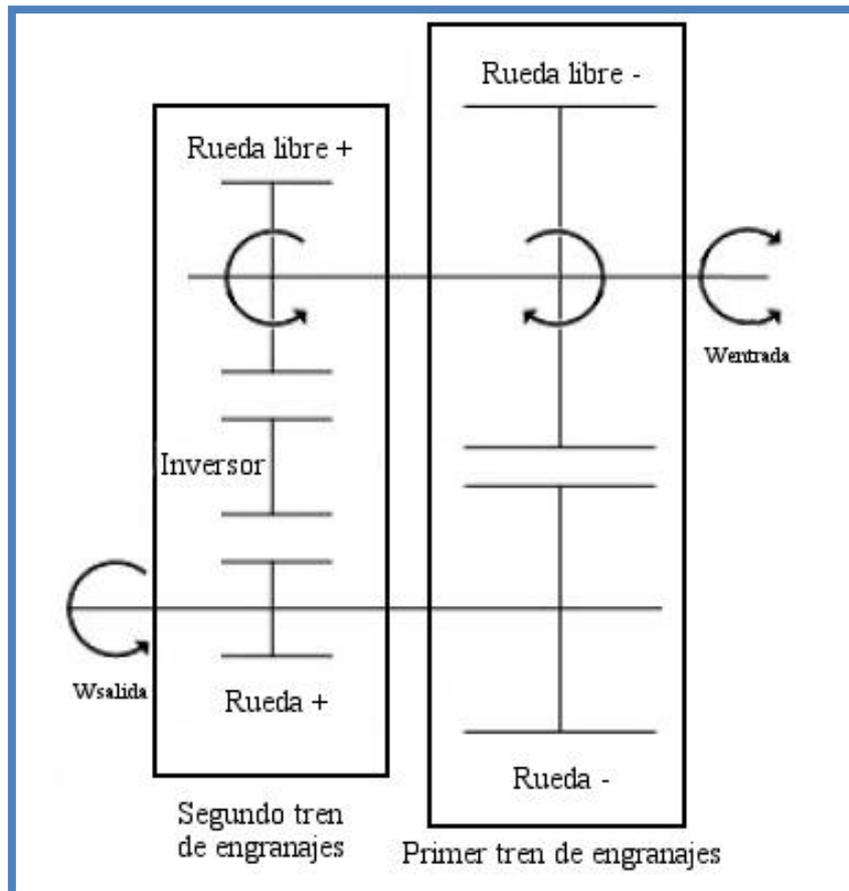


Figura 4-9. Esquema del funcionamiento del rectificador. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-38 en la página 86.

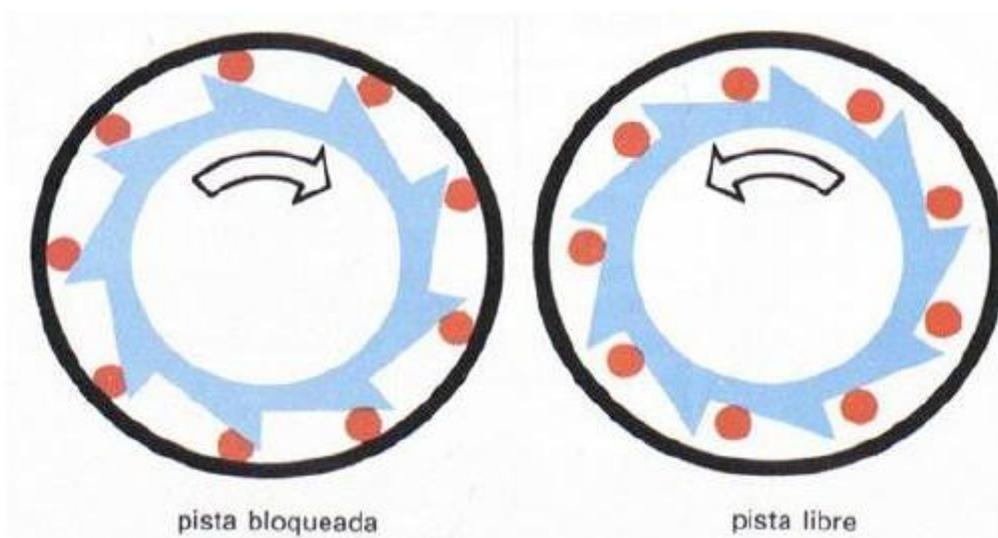


Figura 4-10. Funcionamiento interno de las ruedas libres. Imagen obtenida de la fuente [3], figura 2-6 en la página 7.

Como se ha comentado en el párrafo anterior, tras el paso del movimiento por el rectificador, el giro del eje de salida de la CVT tiene un único sentido de giro. En la figura 4-11 se muestra un esquema comparativo entre el movimiento del balancín y el que se obtiene a la salida de la CVT gracias al mecanismo rectificador. Se recuerda que, como se comentó en el capítulo 1, uno de los objetivos es ver el funcionamiento del sistema modificando este subsistema.

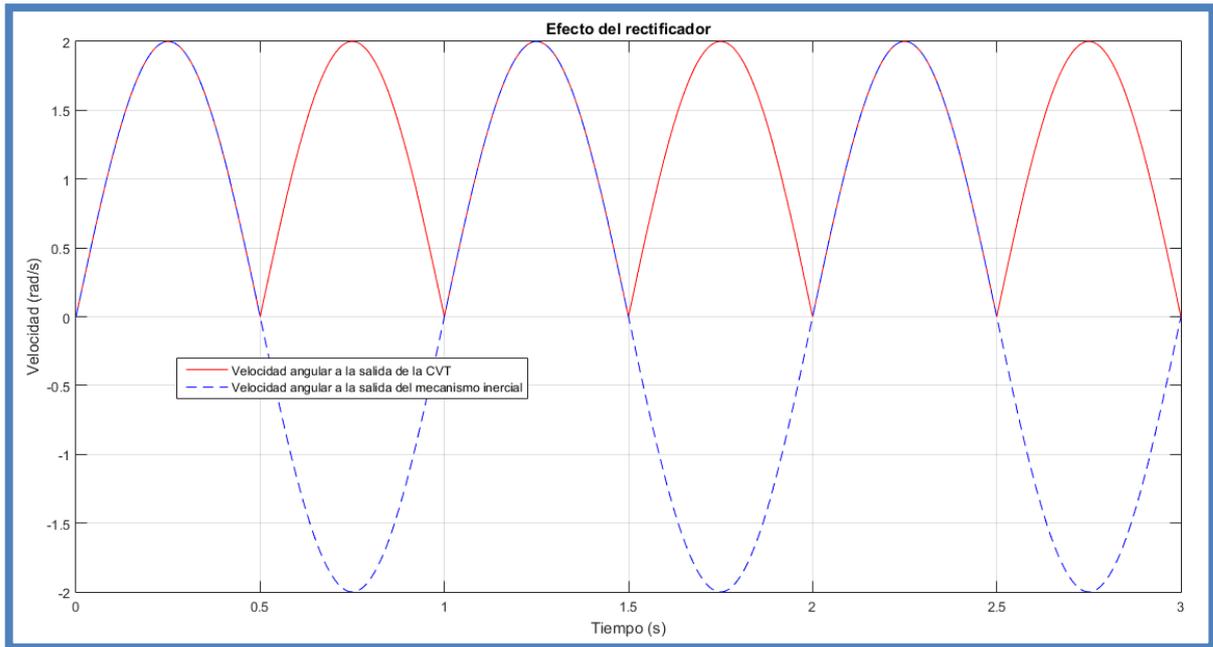


Figura 4-11. Esquema del efecto del rectificador.

## 4.2 Segundo montaje. Instalación de la caja de cambios

El montaje de la caja de cambios en el banco de ensayos es uno de los puntos más críticos, ya que hubo que desplazar la mayoría de los elementos del banco para adaptarlos a dicha caja de cambios y supuso un trabajo de alineación de todos los elementos bastante complejo. Una descripción pormenorizada se encuentran en el anexo A y en las figuras 4-12 y 4-13 se puede ver el resultado final del montaje.



Figura 4-12. Caja de cambios instalada.

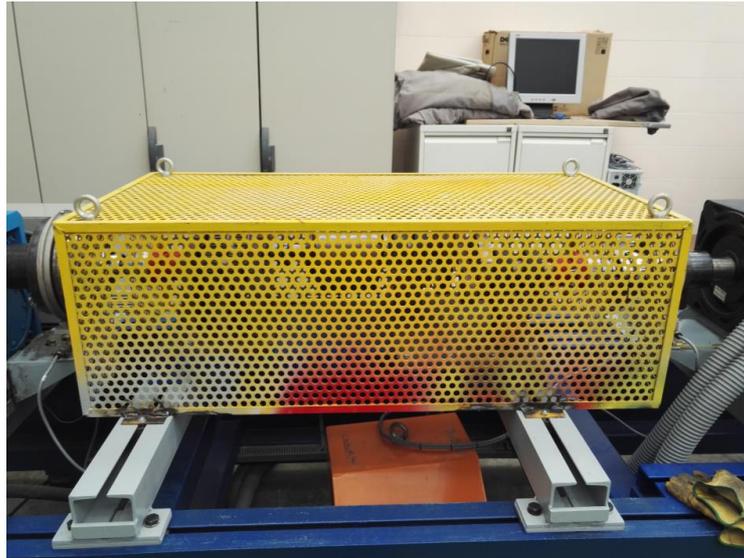


Figura 4-13. Jaula de seguridad y caja de cambios instaladas.

### 4.3 Problema detectado en las primeras pruebas

Los primeros problemas aparecen al poco tiempo de comenzar a realizar pruebas con la caja de cambios ya instalada. Tras algunas pruebas cortas realizadas manualmente para comprobar que todo funcionara correctamente, se detectan ruidos de causa desconocida y se detiene el ensayo.

Se realiza una primera inspección visual por si se había producido la rotura en alguno de los componentes. Tras descartarlo se comienza de nuevo con las pruebas poniendo especial atención para intentar localizar el origen del ruido. A bajas velocidades todo parece correcto, pero en cuanto se sube un poco la velocidad del motor comienza a producirse el ruido que hace pensar en un mal funcionamiento. El ruido parece provenir de los soportes que sustentan el eje de entrada de la caja de cambios, por lo que se piensa que el rodamiento interno ha fallado.

Se paran todas las pruebas y se retira la jaula de seguridad para comenzar a estudiar un posible recambio necesario del rodamiento o el soporte completo. Sin embargo, durante el estudio de los soportes se detecta que los tornillos de sujeción de estos estaban muy flojos, tanto que se podían retirar manualmente sin la ayuda de ninguna llave, como se muestra en la figura 4-14.



Figura 4-14. Tornillos sin el apriete adecuado.

Se cae en la cuenta de que durante la instalación de la caja de cambios se repasó el apriete de todos los tornillos de sujeción de los elementos con el chasis y los tornillos de las juntas, pero no se comprobaron los tornillos propios de la caja de cambios. Este diseño llevaba mucho tiempo sin usarse y el paso del tiempo pudo producir la pérdida del par de apriete de estos tornillos. Se comprueban todos los tornillos de la caja de cambios, la mayoría tenían un apriete adecuado, pero los de los soportes y los pasadores del eje de entrada de la caja de cambios con la brida que va posteriormente a la junta de entrada se encontraban con un apriete insuficiente.

Es muy posible que el ruido fuera producido por las holguras y las vibraciones producto de las mismas. Por ello se vuelve a colocar la jaula de seguridad y se realizan pruebas para comprobar si ha desaparecido el ruido, ya que sigue cabiendo la posibilidad de que las vibraciones hayan producido daños en los soportes o en sus rodamientos. Una vez hecho esto se realizan pruebas manuales poniendo especial atención en comprobar si se había solucionado el problema, y efectivamente solo se escucha el ruido propio del banco funcionando.

#### 4.4 Ensayos de la caja de cambios

Una vez hechas las pruebas pertinentes y solucionados los primeros problemas que han surgido, se pasa a planificar los ensayos que se van a realizar. Se quieren hacer tres grupos de ensayos. El primero con la caja de cambios funcionando de la forma descrita en la sección 4.1.

El segundo es diseñando una modificación para el rectificador que consiga bloquear uno de los trenes de engranajes, y el tercero es similar al segundo, pero bloqueando el otro tren de engranajes. Para comprender mejor en que consisten estas modificaciones y cual es su efecto en el funcionamiento de la reductora se añaden las figuras 4-15 y 4-16 donde se muestra esquemáticamente el funcionamiento de la primera modificación, y las figuras 4-17 y 4-18 donde se muestra la misma información sobre la segunda modificación. De esta forma se quiere comprobar el efecto que tiene el rectificador y las diferencias entre su funcionamiento con las modificaciones y sin ellas.

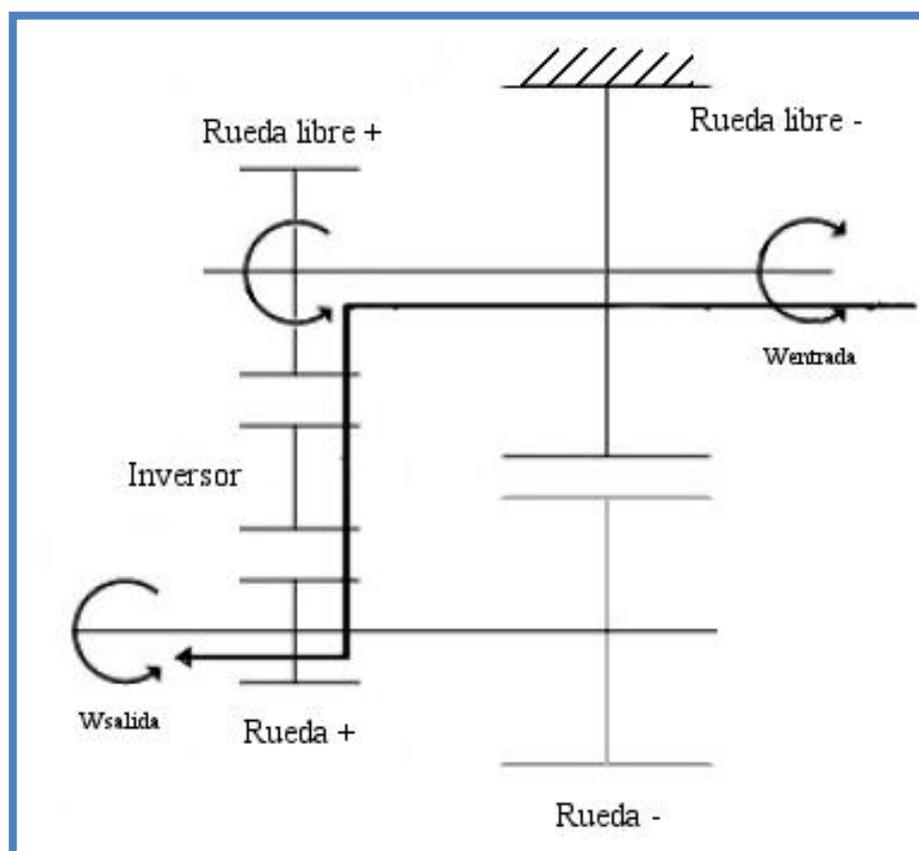


Figura 4-15. Esquema de la primera modificación. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-38 en la página 86.

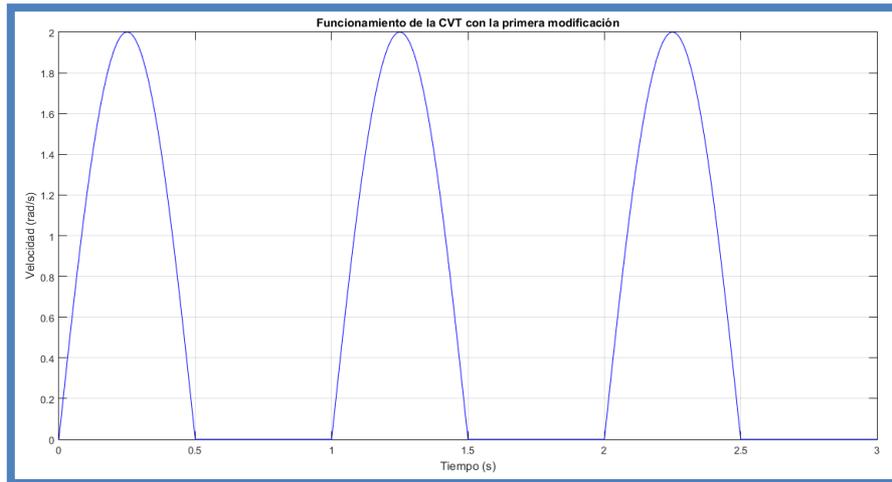


Figura 4-16. Comportamiento con la primera modificación.

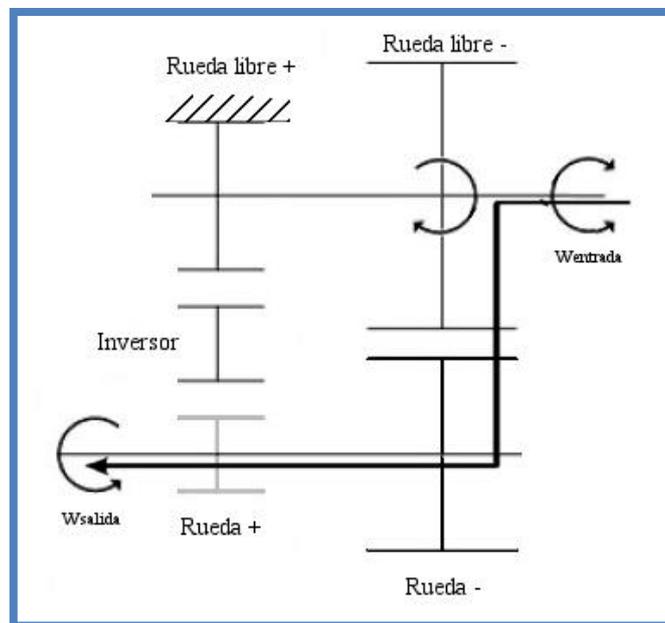


Figura 4-17. Esquema de la segunda modificación. Imagen obtenida de la fuente [1], figura 3-38 en la página 86.

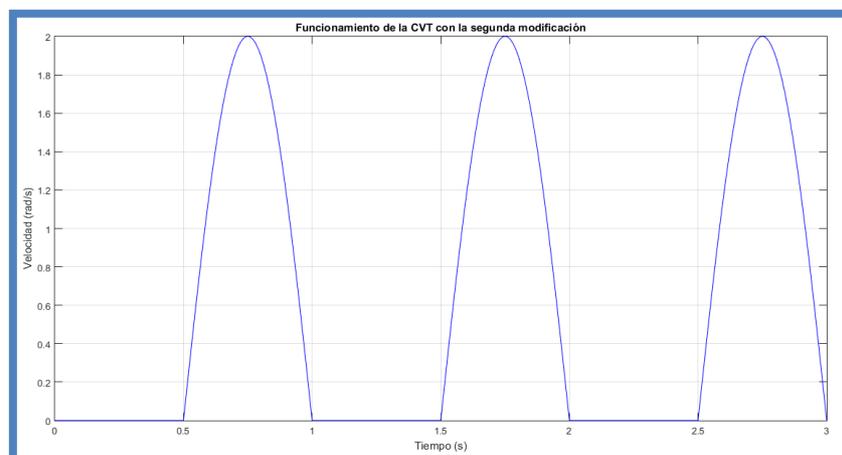


Figura 4-18. Comportamiento con la segunda modificación.

#### 4.4.1 Ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones

Se comienza con los ensayos del primer grupo, es decir, con el rectificador y la caja de cambios funcionando sin ningún tipo de modificación. El primer planteamiento de estos ensayos era realizar una serie de ensayos similares a los de calibración, ensayando la caja aumentando progresivamente la velocidad del motor con la carga de freno a cero y posteriormente efectuando ensayos en los que se aumenta también la carga del freno. Como se verá más adelante en la sección 4.4.1.1, habrá que matizar la naturaleza de estos ensayos ante los resultados obtenidos en las primeras pruebas.

Se realizan varias pruebas fallidas ya que se habían dispuesto unas alarmas para los pares muy bajas para no dañar la caja de cambios, que se tuvieron que ir elevando poco a poco tras cada prueba fallida para que los picos registrados en los pares no impidieran finalizar los ensayos.

También se confirma un efecto que se esperaba tras los resultados obtenidos de la calibración., el comportamiento de la salida de la caja de cambios es diferente si se realizan los ensayos con el freno inactivo o con el freno activo y con su carga puesta a cero. La diferencia es tan clara que hay valores de la señal de velocidad del motor en los que hay un movimiento con cierta soltura en la salida con el freno inactivo, mientras que la salida se encuentra totalmente bloqueada con el freno activo y sin carga.

Se van a adelantar parte de las conclusiones para poder comprender el por qué de este efecto y cómo se han modificado los ensayos para adaptarlos a estas circunstancias. Tras mostrar los resultados de los ensayos se volverá a hacer referencia a ellos, para que las conclusiones queden completas.

Durante la calibración se había detectado un efecto relacionado con el momento en el que el freno se encendía o se apagaba, y se podía ver como las interferencias electromagnéticas afectaban a los valores recogidos por la tarjeta de adquisición de datos. Pero se creía que ésta era una diferencia puntual, no se había detectado una diferencia tan clara sostenida durante el tiempo del ensayo.

Parece que es contradictorio obtener diferentes resultados con dos configuraciones que, a priori, parecen iguales. No obstante, no hay que caer en la conclusión precipitada de pensar que la resistencia que opone el freno es la misma cuando éste se encuentra inactivo que cuando está activo, aunque su carga sea nula. Se debe recordar que el freno es un generador de una gran potencia y tamaño con un gran bobinado en su interior, y cuando se enciende por ellos corre una corriente que genera un campo electromagnético que se opone al movimiento. Como dicta la intuición, este campo será mayor cuanto más alta sea la carga del freno, pero no significa que sin carga no haya un campo que genere un cierto par resistente.

##### 4.4.1.1 Definición del método de ensayo

Se pasa a detallar el procedimiento que finalmente se ha seguido para realizar los ensayos. Este va a consistir en realizar ensayos en los que se va a ir variando el régimen de velocidades siguiendo la curva programada que se puede ver a continuación en la figura 4-19.

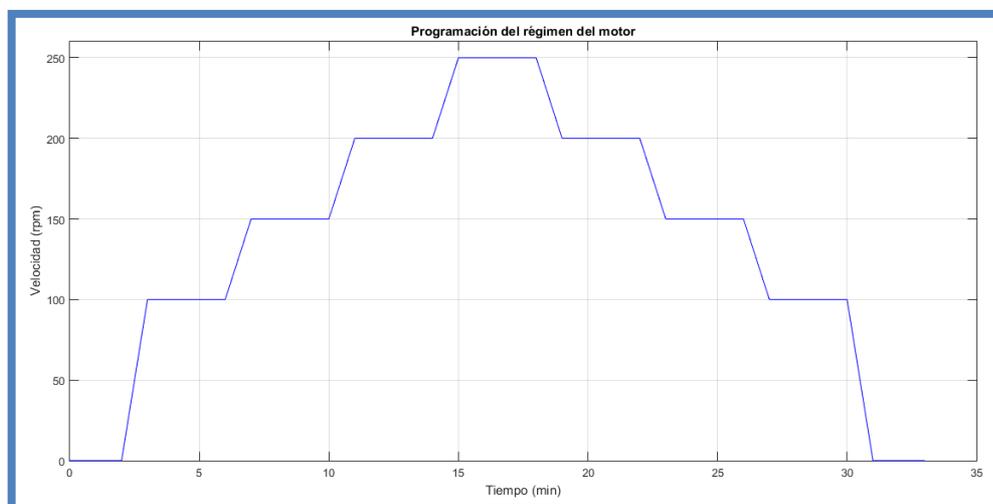


Figura 4-19. Entrada programada para el motor.

Los ensayos se realizarán en primer lugar con el freno inactivo y posteriormente con el freno activo. De esta forma se busca ver de forma más patente la diferencia entre tener el freno activo o inactivo. Se realizan varios ensayos de cada una de estas formas para comprobar que los resultados son coherentes entre sí y no se ha cometido ningún error a la hora de realizar alguno de ellos.

#### 4.4.1.2 Ensayos con el freno inactivo

##### 4.4.1.2.1 Primeros ensayos

Se comienza con los ensayos realizados con el freno inactivo. A continuación, se muestran las velocidades del motor y de la salida de la caja de cambios en los cuatro primeros ensayos en la figura 4-20.

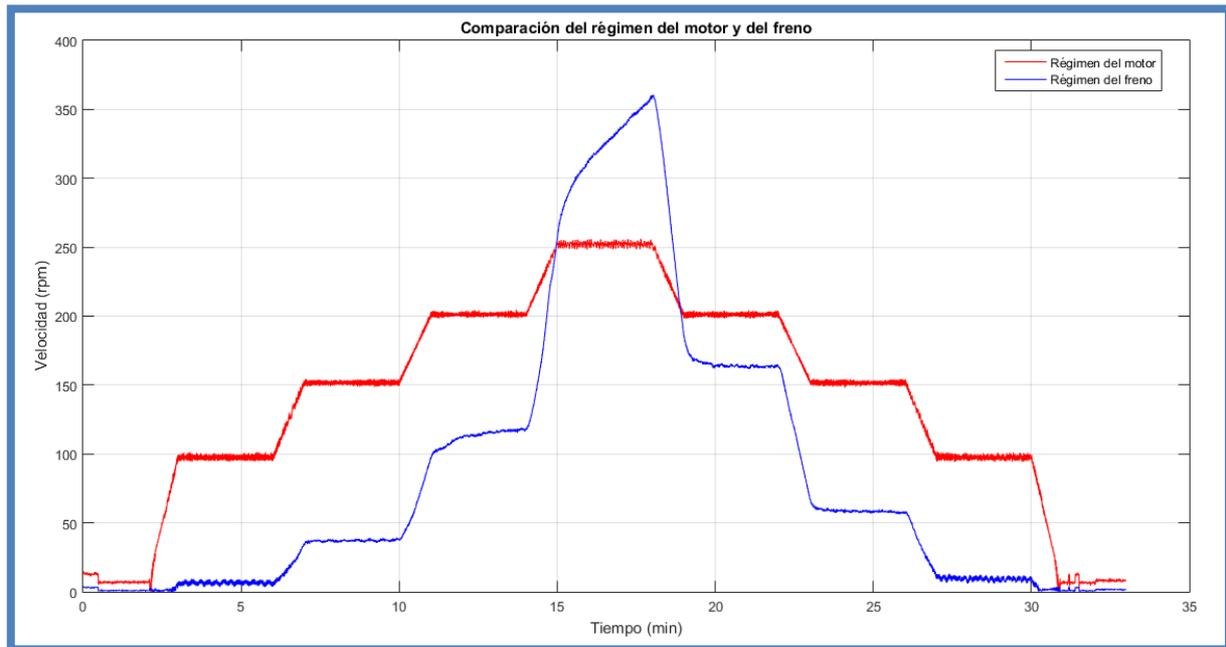


Figura 4-20. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el primer ensayo.

Se puede ver fácilmente que a una velocidad de entrada de 100 rpm velocidad de salida es muy baja y se mueve con dificultad, con muchos picos en su registro en este primer ensayo. Cuando se sube a velocidades mayores del motor se puede ver como ya no hay picos en la señal de salida de la caja de cambios. Sin embargo, en la señal del motor también hay picos que se pueden observar durante todo el ensayo. Puede resultar poco evidente que a velocidades altas sea más clara (la banda de valores es mucho más pequeña, hay menos oscilaciones) en la señal del freno que en la del motor. Esto es debido a la configuración de la caja de cambios, ya que su entrada en el mecanismo de cuatro barras introduce bastantes vibraciones y causan el efecto que se acaba de describir.

También se puede comprobar como para cada velocidad se va modificando la relación de transmisión, siendo ésta menor que uno para velocidades por debajo de 250 rpm aproximadamente del motor y mayor que uno para velocidades iguales o superiores a 250 rpm aproximadamente.

Otro punto a destacar es que, en los tramos del ensayo en los que se mantiene constante el régimen de velocidades del motor, no transcurre el tiempo suficiente para alcanzar el régimen permanente en la velocidad a la salida de la caja de cambios. Este efecto no ocurre a bajas velocidades, pero si se percibe en velocidades del motor mayores o iguales a 200 rpm.

Y por último hay que señalar que, a pesar de que la curva programada para la velocidad del motor es simétrica respecto a la mitad del tiempo del ensayo y se cumple en los datos obtenidos, no ocurre lo mismo con las velocidades obtenidas en la salida de la caja de cambios que son claramente más altas durante la segunda mitad del ensayo (durante la deceleración) que en la primera mitad del ensayo (durante la aceleración).

Para comprobar la coherencia de estos datos se sigue con la representación del segundo ensayo en la figura 4-21.

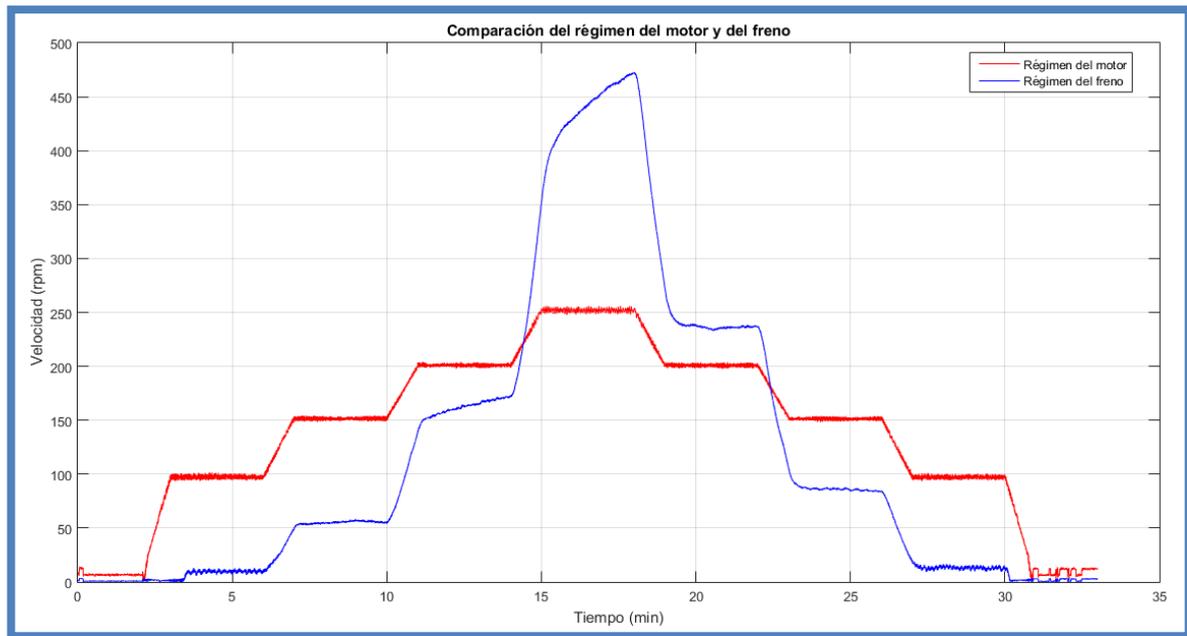


Figura 4-21. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el segundo ensayo.

En esta segunda prueba se puede confirmar que se reproducen todos los fenómenos descritos para el primer ensayo, aunque se pueden ver dos diferencias con el primero. La primera es que hay un pequeño desfase entre el momento en el que se alcanza la velocidad de 100 rpm durante la aceleración y el momento en el que empieza a girar la salida de la caja de cambios. Esto vuelve a estar causado por la dificultad que tiene para mover la salida con una velocidad tan baja.

La segunda diferencia es que el pico de la velocidad de salida de la caja de cambios alcanza un valor mayor que en el primer ensayo. Esto puede llevar a pensar que hay algún error, ya que el ensayo se ha repetido a continuación del primero con la misma entrada programada, y aunque la forma de la salida es similar en los dos ensayos, los valores recogidos a la salida del segundo son mayores que en el primero.

Se continúa con el tercer ensayo para tener más datos con los que obtener unas conclusiones más precisas. En la figura 4-22 se muestra el registro de velocidades de dicho ensayo.

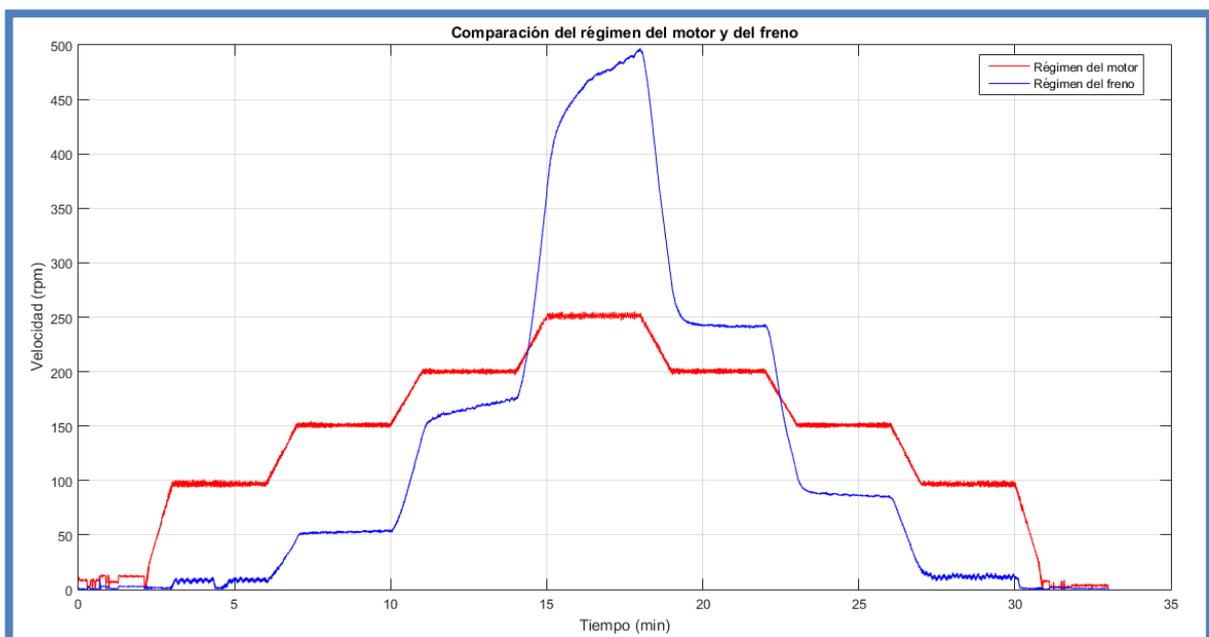


Figura 4-22. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el tercer ensayo.

En esta figura se puede percibir como durante la aceleración no hay desfase como en el tramo de aceleración cuando se alcanzan las 100 rpm como en el segundo ensayo, pero se puede apreciar como se produce una pequeña parada durante el tramo de velocidad constante. En cuanto al valor del pico máximo de la velocidad de salida, ha crecido ligeramente con respecto al segundo ensayo, por lo que se hace mayor aún la diferencia con el primer ensayo. En cuanto al resto de observaciones hechas en el primer y segundo ensayo, éstas son de nuevo aplicables a este ensayo, solo se diferencian en lo descrito al comienzo de este párrafo.

Se pasa a realizar el cuarto ensayo con esta configuración. El resultado del mismo en velocidades se refleja en la figura 4-23. Ante las diferencias detectadas en los ensayos anteriores se realiza una rápida inspección visual del banco de ensayos para comprobar que no hay ningún factor relacionado con el montaje que pueda ser la causa de estas diferencias. Efectivamente, no se detecta ningún cambio en el montaje durante los ensayos. Solo se nota un aumento de la temperatura del reductor a pesar de estar funcionando el sistema de refrigeración del aceite, pero es algo lógico tras haber realizado varios ensayos consecutivos.

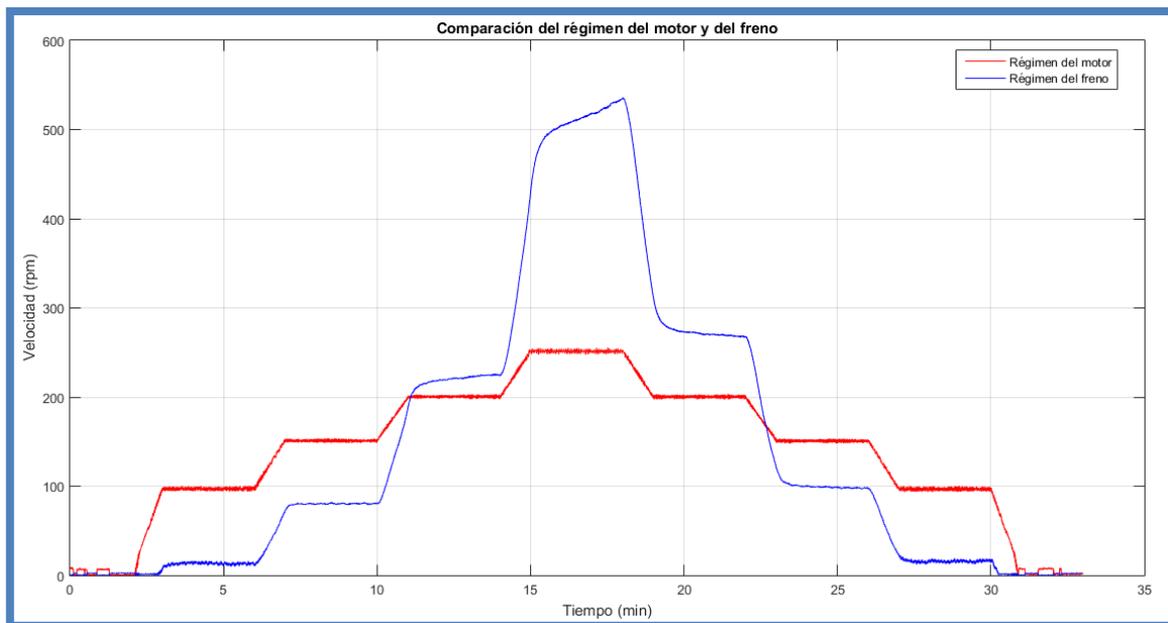


Figura 4-23. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el cuarto ensayo.

En este ensayo se puede observar que no hay ningún desfase ni parada durante la aceleración en el tramo de 100 rpm, aunque continúan los picos que denotan la dificultad de mover la salida de la caja de cambios a esa velocidad tan baja. Lo que se puede notar de nuevo es un aumento en el valor máximo de la velocidad de la salida de la caja de cambios con respecto al tercer ensayo, es decir, a cada ensayo que se realiza se obtienen valores mayores de la velocidad a la salida. Como en el resto de los ensayos, las demás reflexiones que se hicieron en el primer ensayo son aplicables a este cuarto ensayo.

Se intentó realizar un quinto ensayo para comprobar si seguía la tendencia ascendente que tomaban los valores de la velocidad de salida a cada ensayo consecutivo que se iba realizando. Este ensayo quedó interrumpido por una de las alarmas que se habían establecido en las primeras pruebas. Ya que en los anteriores ensayos no había ocurrido esto, se puede llegar a la conclusión de que la tendencia creciente se ha mantenido hasta el punto de que se superase el valor de la alarma.

#### 4.4.1.2.2 Conclusiones e hipótesis realizadas a partir de los primeros ensayos

Tras estos ensayos se pueden sacar las primeras conclusiones e hipótesis sobre los datos obtenidos. Como se viene repitiendo tras cada ensayo, se puede ver que la relación de transmisión cambia en función de la velocidad de entrada sin ningún escalón salvo los producidos durante las aceleraciones y deceleraciones, por lo que se recoge adecuadamente el cambio continuamente variable.

Por otro lado, se puede ver que a una velocidad igual o inferior a 100 rpm la caja de cambios gira con dificultad en su salida, por lo que los resultados de los ensayos varían de unos a otros en este rango. Sin embargo, no significa que no se pueda ensayar a esta velocidad, si no que hay que tenerlo en cuenta a la hora de analizar los resultados.

Además, como se ha comentado en la sección 4.4.1.2.1, en los tramos del ensayo en los que se mantiene constante el régimen de velocidades del motor, no transcurre el tiempo suficiente para alcanzar el régimen permanente en la velocidad a la salida. Este efecto se percibe en velocidades del motor mayores o iguales a 200 rpm. Para intentar alcanzar el permanente se debe realizar un ensayo en el cual se mantenga la velocidad de entrada de 200 rpm durante el tiempo suficiente para alcanzar un valor estable de la salida de la caja de cambios.

En cuanto a las vibraciones que se pueden apreciar en los datos de la señal del medidor de par del motor introducidos por el mecanismo de 4 barras, aunque no suponen una gran distorsión de los datos no deben ser despreciadas. Cabe la posibilidad de que estas vibraciones pudieran ser la causa de que hubieran perdido su par de apriete y se aflojaran los tornillos en esta parte de la caja de cambios que se descubrieron tras la instalación de ésta en el banco de ensayos y se hubieran realizado las primeras pruebas.

Finalmente se formula una hipótesis para explicar los dos fenómenos que aún no se han tratado en estas conclusiones, es decir, la diferencia en los resultados a la salida de la caja de cambios entre las fases de aceleración y deceleración y entre los distintos ensayos realizados. La hipótesis se fundamenta en el único cambio que se detectó durante la inspección del banco, la temperatura elevada del reductor antes del freno. La hipótesis se detalla a continuación.

Al comenzar el primer ensayo, la temperatura del aceite del reductor es aún baja. Conforme avanza el ensayo, la salida va adquiriendo una cierta velocidad que produce el movimiento y, por tanto, el calentamiento del aceite del reductor. A la par que ocurre esto, también van aumentando su temperatura los elementos de lubricación como la grasa de los rodamientos que soportan los ejes de la caja de cambios y el aceite de los soportes con rodamientos. Al elevar la temperatura se reduce la viscosidad de todos ellos y, por tanto, estos elementos pueden mover con mayor facilidad, ya que el par resistente que producían es menor.

Esto explicaría por qué se tienen siempre valores mayores de la velocidad de salida en la segunda mitad de los ensayos. Además, si los ensayos se realizan con poca diferencia de tiempo entre uno y otro, el calor que ha ganado durante el ensayo previo aún no se habrá disipado totalmente antes del siguiente ensayo y la temperatura de partida será mayor. De esta manera se explica también que, a medida que se van realizando más ensayos, los valores que se obtienen de la velocidad a la salida comparando los ensayos son cada vez mayores.

Se cree que el principal componente que influye en esta hipótesis es el aceite del reductor, ya que hay una mayor cantidad en volumen que en el resto de los elementos de lubricación de la caja de cambios y solo se produce un aumento de su temperatura si hay movimiento a la salida. Además, el aceite utilizado es muy denso a bajas temperaturas. Sin embargo, también hay que tener en cuenta los rodamientos y soportes de la caja de cambios. La caja de cambios se ha ensayado un bajo número de ocasiones, por lo que es muy probable que sus elementos de lubricación hayan perdido parte de sus propiedades con el tiempo y la suciedad acumulada.

#### 4.4.1.2.3 Nuevos ensayos para confirmar las hipótesis

A raíz de los resultados de estos ensayos se plantea realizar unos nuevos buscando encontrar los límites de la caja de cambios cuyo comportamiento va cambiando durante y tras cada ensayo. Para ello se elevan los valores de las alarmas y se plantean dos series de ensayos adicionales.

El primero consiste en realizar tantos ensayos como sea posible siguiendo la misma curva programada para la evolución de la velocidad del motor durante el mismo día. El objetivo es determinar cual es el mayor valor que alcanza la velocidad de salida. En primer lugar, se representan en la figura 4-24 los datos recogidos por el medidor de par de del motor.

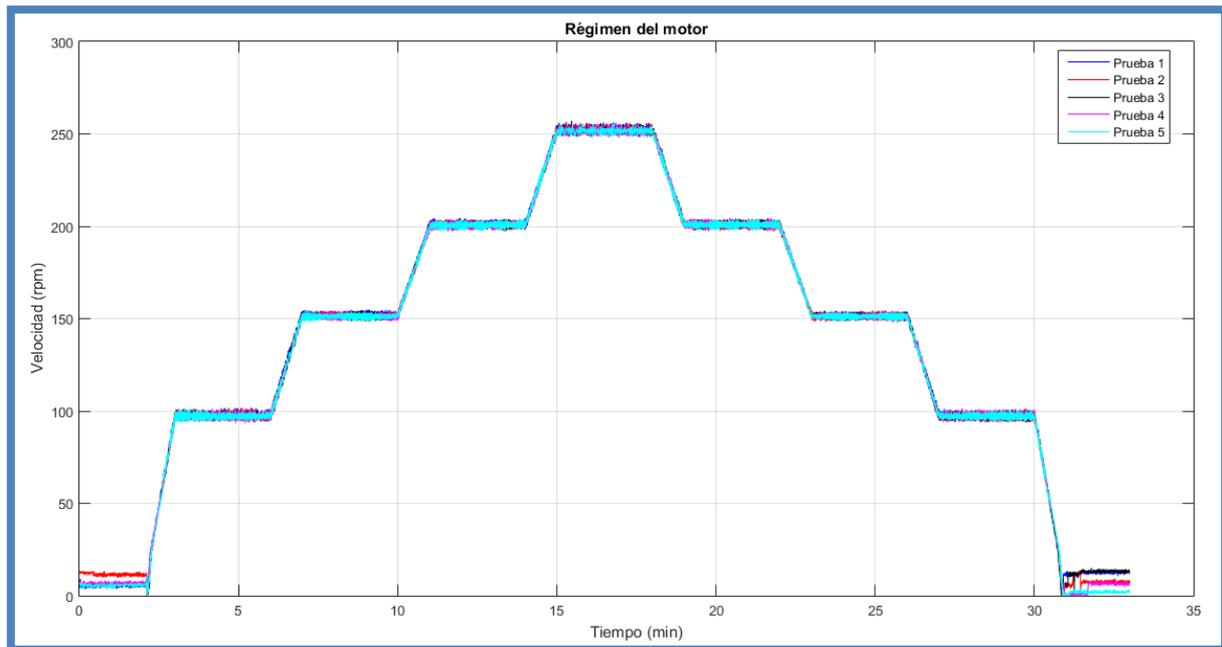


Figura 4-24. Velocidad de motor durante la serie de ensayos.

Como se puede ver en la figura 4-24, los resultados siguen el mismo patrón que en los ensayos realizados en el primer montaje con la junta, es decir, todos muy similares entre sí salvo una mínima diferencia cuando el motor se encuentra parado.

Se pasa ahora a la representación de las velocidades de salida de la caja de cambios. Además, se ha incluido la señal recogida durante el primer ensayo como forma representativa de la velocidad de entrada en cada instante de tiempo. Estos son los datos más importantes que se querían obtener con la realización de esta serie de ensayos. Los resultados se pueden ver en la figura 4-25.

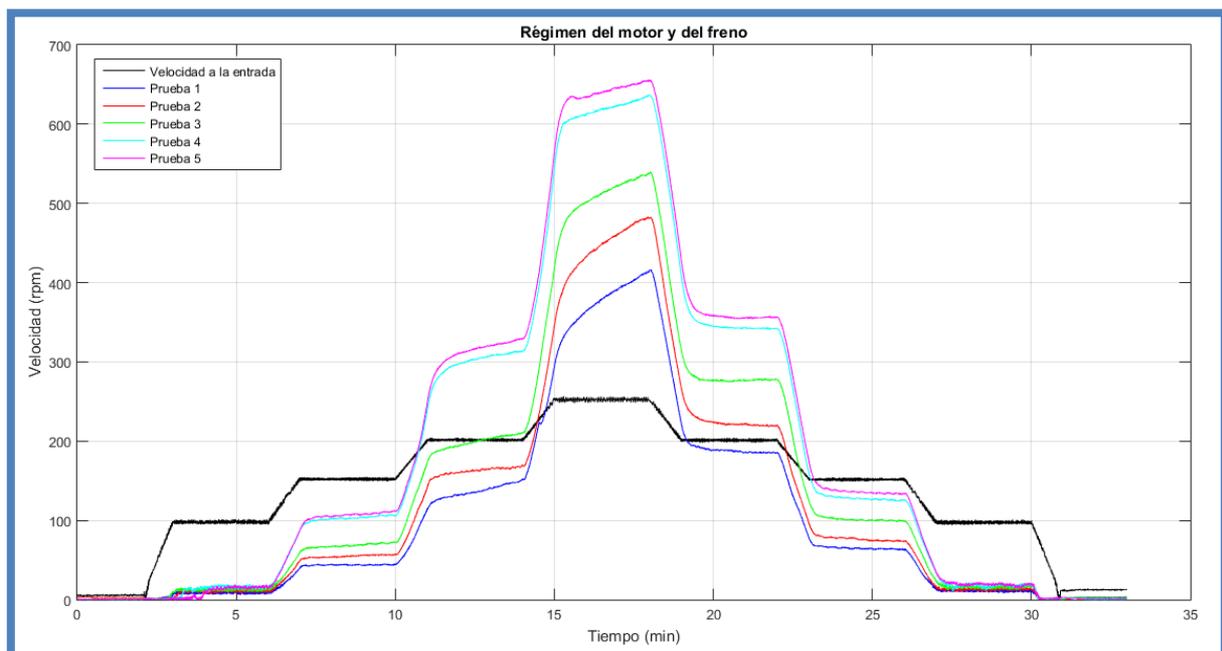


Figura 4-25. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos.

El valor máximo se alcanza, como era de esperar, en el último ensayo realizado. Ese valor es el de 656,2560 rpm a la salida de la caja de cambios.

Como se puede ver, en las tres primeras pruebas el aumento en la velocidad de salida es prácticamente idéntico entre ellas, quedando la segunda aproximadamente en el punto medio entre la primera y la tercera. Sin embargo, en la cuarta prueba el aumento es mayor que en los casos anteriores pero el aumento en el último ensayo es menor que en los primeros ensayos. De hecho, parece que el quinto ensayo seguiría la misma evolución de los tres primeros, y que es solo el cuarto ensayo el que no sigue esa progresión.

Para intentar averiguar la causa del comportamiento observado en la figura 4-25, se vuelven a representar los datos obtenidos en los primeros cuatro ensayos con la caja de cambios de la forma comparativa que se acaba de ver. Aunque esta serie de ensayos no es tan completa como la analizada anteriormente, ya que no se realizaron todos los ensayos a causa de las alarmas, puede dar una idea comparativa del comportamiento entre el tercer y cuarto ensayo.

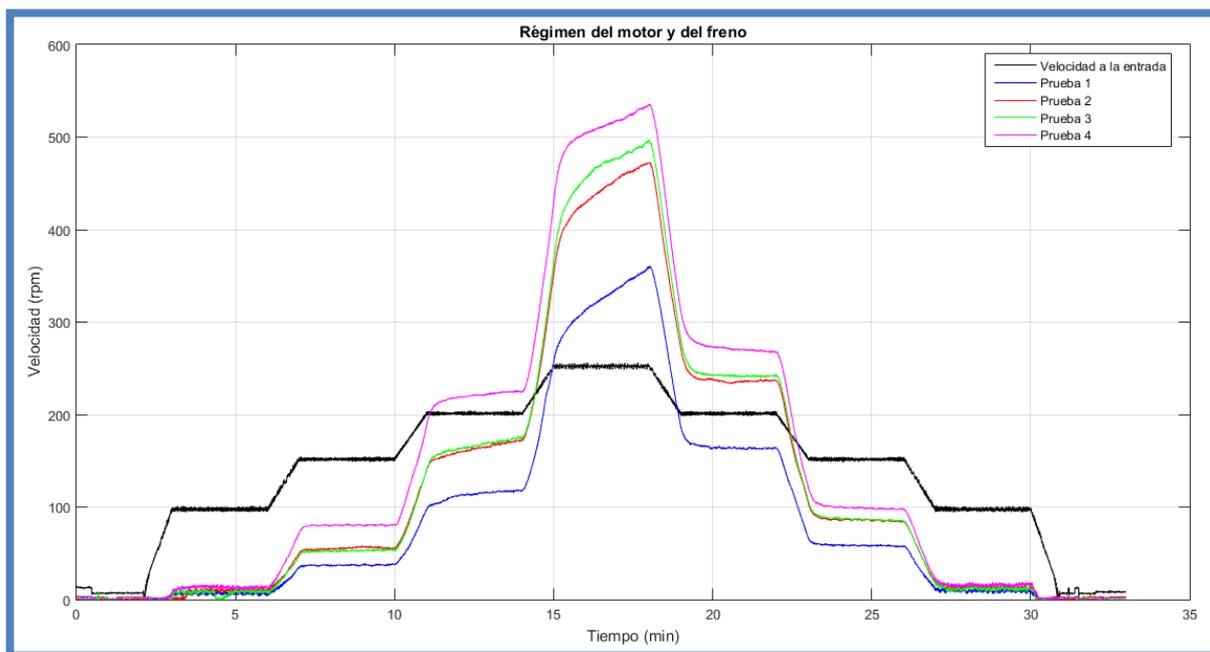


Figura 4-26. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en los primeros cuatro ensayos.

Como se puede deducir de la figura 4-26, en esta serie de ensayos la mayor diferencia entre ensayos se da entre el primero de ellos y el resto. Sin embargo, los siguientes tres ensayos tienen un aumento más similar entre sí. Por tanto, la causa del comportamiento observado en las figuras 4-25 y 4-26 es que la temperatura del aceite y los elementos de lubricación se ve influida en cada momento por la temperatura ambiente, el tiempo pasado entre ensayos y cualquier otro factor que pueda influir en el cambio de la temperatura de los elementos anteriormente enumerados.

Una vez realizada esta serie de ensayos se efectúa la segunda serie. Ésta consiste en realizar ensayos manuales en los que se establece la velocidad del motor de 250 rpm y se deja funcionar el banco de ensayos hasta que la velocidad de salida de la caja de cambios deje de elevarse y se alcance el régimen permanente. De esta forma se podría establecer cual es el tiempo necesario para que se estabilice la señal y tenerlo en cuenta a la hora de programar los posteriores ensayos.

Sin embargo, tras dos intentos en los que se llegó a dejar funcionando el banco de ensayos durante un tiempo aproximado de tres horas sin conseguir que la señal de la velocidad de salida dejara de aumentar. Uno de estos ensayos se puede ver en la figura 4-27. Solo se realiza un análisis sencillo de estos ensayos ya que no representan una situación real que se pueda dar durante la conducción de un vehículo. No se va a conducir un vehículo durante 3 horas siempre a la misma velocidad. Por ello, solo se extrae la conclusión de que no se puede ensayar la caja de cambios en régimen permanente a velocidades de 250 rpm y se pasa a los siguientes ensayos.

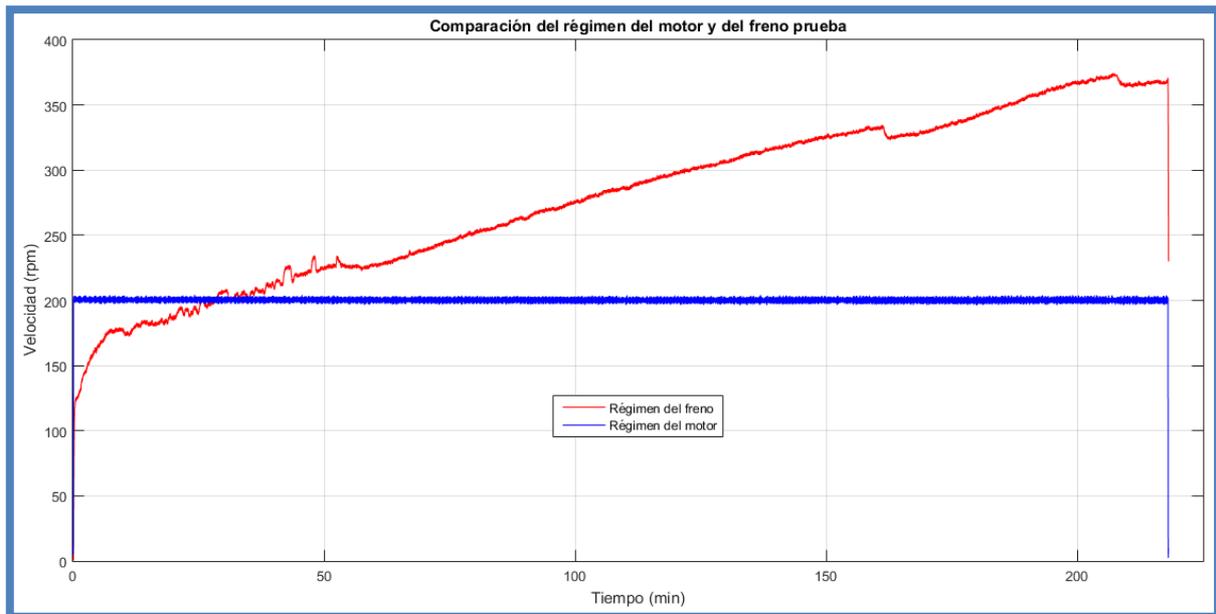


Figura 4-27. Ensayo prolongado de la caja de camnios.

#### 4.4.1.3 Ensayos con el freno activo

Se realizan ahora los ensayos de la caja de cambios con el rectificador funcionando sin ningún mecanismo de bloqueo, pero con el freno activo y con carga de frenado nula. El procedimiento de ensayos es el mismo que se ha venido ejecutando habitualmente, se realizan varios ensayos en los que la evolución de la velocidad del motor sigue la curva programada que se mostró en la figura 4-19.

##### 4.4.1.3.1 Serie de ensayos con freno

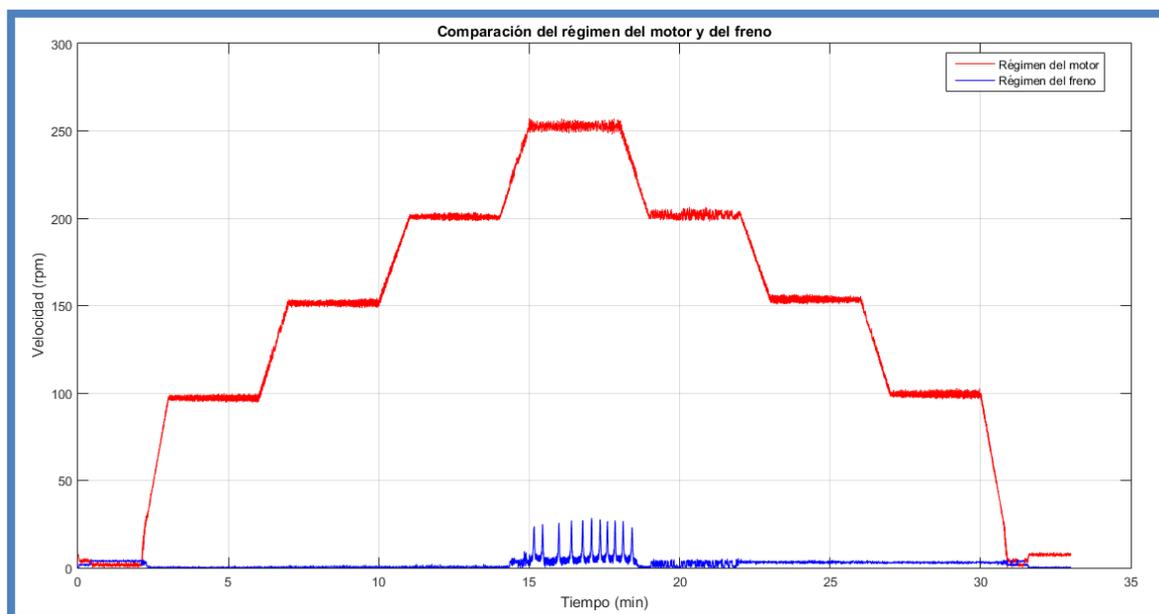


Figura 4-28. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el primer ensayo con freno.

En esta representación de la figura 4-28 de los datos obtenidos del primer ensayo se puede comprobar la gran diferencia que hay en la respuesta de salida con los ensayos realizados con el freno inactivo y de ahí los ensayos que finalmente se han realizado. Se puede ver como la salida de la caja de cambios se encuentra la mayor parte del ensayo con velocidad nula, y solo consigue movimiento en su salida cuando se acelera o frena cerca de alcanzar la velocidad de 250 rpm en el motor.

Además, este movimiento se produce con picos. Durante muchos segundos el eje de salida de la caja de cambios se mueve muy lentamente, tanto que viendo la señal podría parecer que es solo la interferencia causada por el motor y el freno en el medidor de par y que el eje está completamente parado. Sin embargo, se sabe que no es así por observación directa, se aprecia que la salida gira muy lentamente. Y, durante muy pocos segundos, se produce un movimiento a mayor velocidad, que se corresponde con un pico en la señal de la velocidad de salida.

Se sigue con la ejecución del segundo ensayo, cuyos resultados se representan a continuación en la figura 4-29.

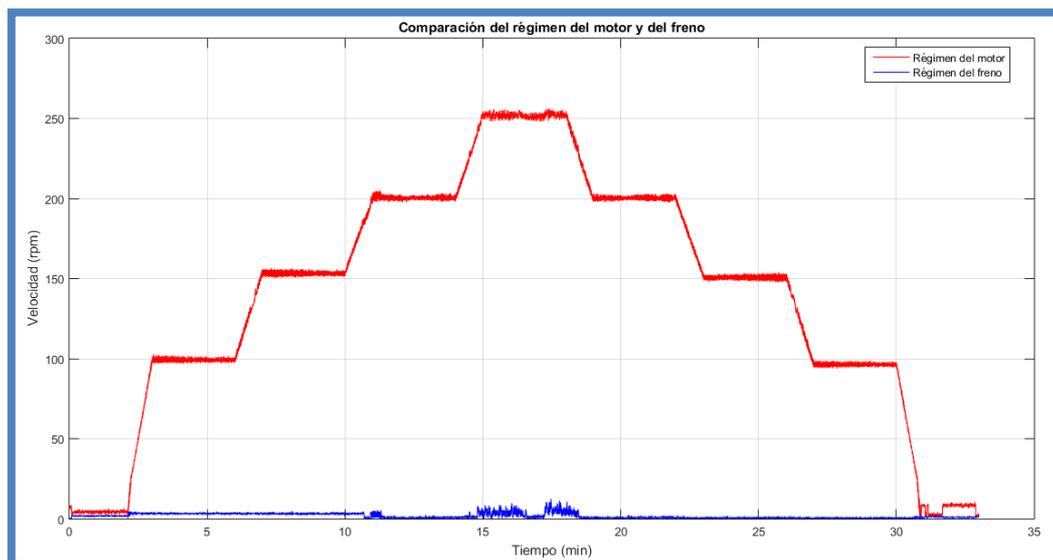


Figura 4-29. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el segundo ensayo con freno.

Como se aprecia, existen muchos puntos en común con el primer ensayo. El movimiento no se produce hasta que se alcanzan las proximidades de las 250 rpm. Sin embargo, también hay puntos en los que ambos ensayos difieren. El primero de ellos es que los valores de la velocidad de salida alcanzaban las 28,529 rpm en el primer ensayo, en el segundo solo llega a 12,433 rpm en su punto más alto, es decir, menos de la mitad de los valores que alcanza en el primer ensayo. El segundo de ellos es que la forma que tiene la curva de velocidad de salida también es diferente, mientras que en el primer ensayo el movimiento se producía con unos picos muy marcados, en el segundo con la misma escala no se aprecian estos picos.

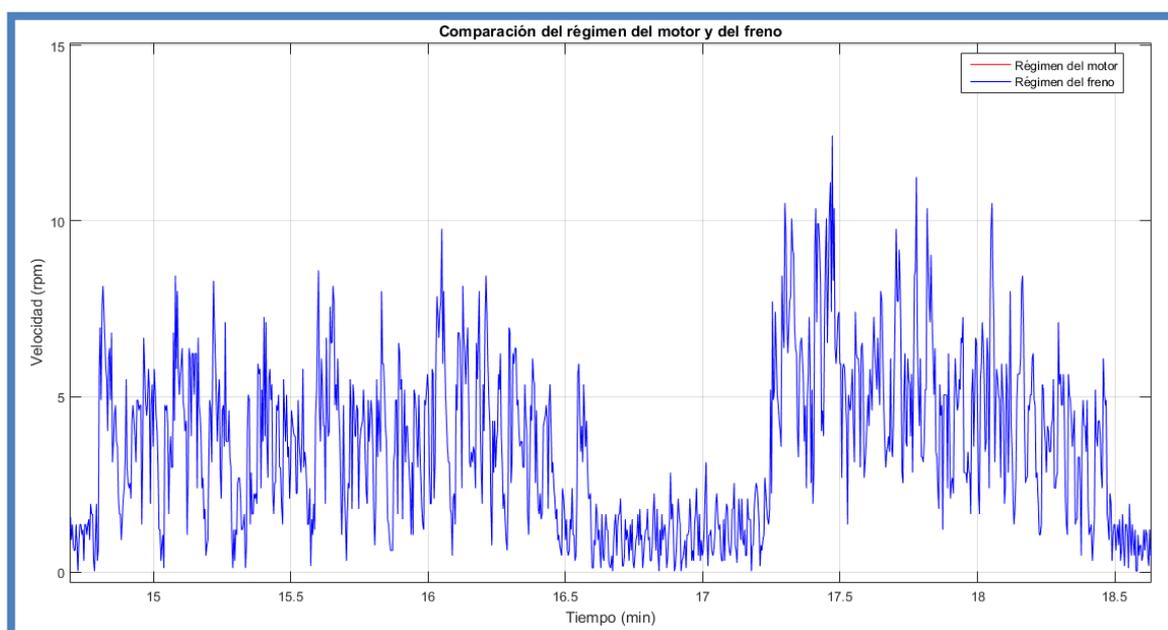


Figura 4-30. Ampliación de la zona central de la velocidad de salida del segundo ensayo con freno.

Se ha realizado una ampliación de la zona dónde se produce el movimiento de la salida de la caja de cambios para ver si, con otra escala, se aprecian picos también en este segundo ensayo. En la figura 4-30 no se puede apreciar que haya un comportamiento que se asemeje al primer ensayo.

Además, se puede detectar como hay un momento en mitad de la zona de movimiento donde la salida baja aún más la velocidad llegando incluso a una situación de bloqueo. Esto difiere completamente de lo recogido en el primer ensayo en el que no se detectó ningún momento de bloqueo de la salida una vez comenzado el movimiento en la salida y hasta que se baja la velocidad del motor.

Por tanto, se tienen dos ensayos cuyos resultados tienen algunos puntos en común pero también puntos muy claros de discrepancia. Se sigue con el tercer ensayo para ver si se asemeja a alguno de los dos, dando a entender que hubo un error en la realización del ensayo opuesto. El tercer ensayo se muestra en la figura 4-31.

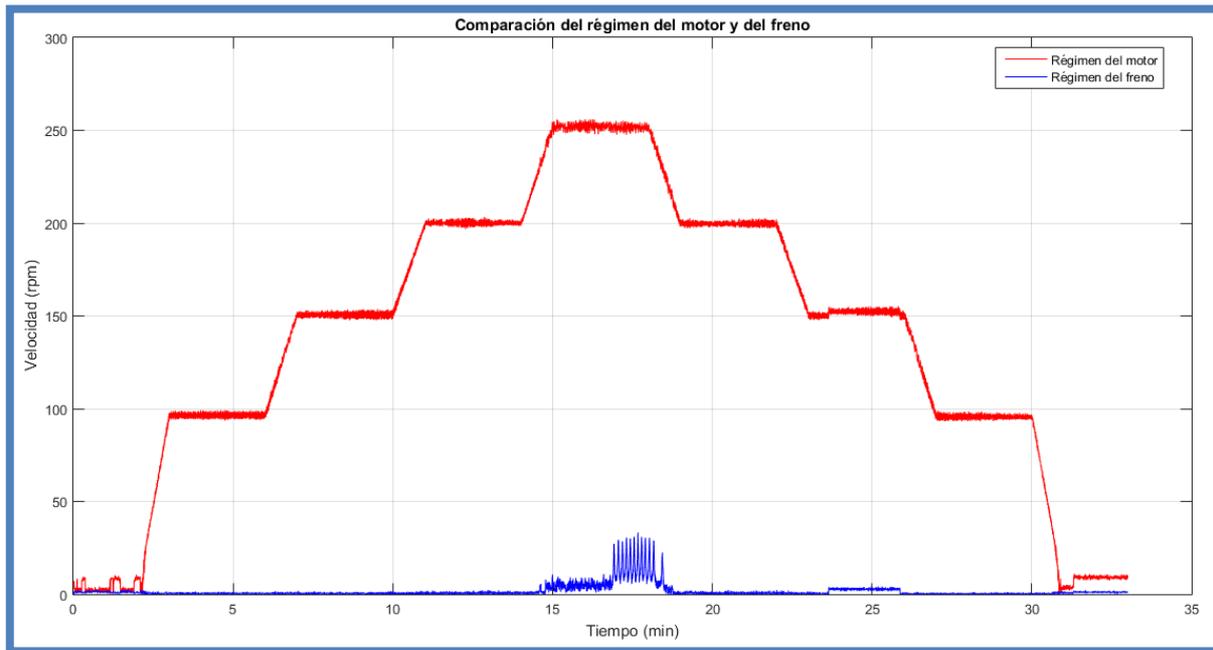


Figura 4-31. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el tercer ensayo con freno.

Antes de entrar en el análisis de la zona central de este tercer ensayo, se quiere centrar la atención brevemente en la zona donde se llega a la zona de 150 rpm constantes de velocidad del motor durante el frenado. Se puede ver como, simultáneamente, hay un pequeño escalón en la señal recogida tanto en el motor como en el freno. Éste está producido por alguna interferencia electromagnética que ha afectado a la señal de los dos medidores de par. Aunque no se sabe la causa de esta interferencia, tiene una duración de aproximadamente dos minutos y no cambia mucho la señal.

Una vez hecha esta puntualización se pasa a la parte central del ensayo. En este tercer caso se tiene algo muy curioso. La primera parte de la señal de salida de la caja de cambios en esta zona central tiene una forma muy similar al segundo ensayo, mientras que la segunda parte tiene mayor similitud con el primer ensayo en el que hay unos picos muy claros.

Parece que en este tercer ensayo se han dado las condiciones de los dos ensayos previos juntos. Para intentar discernir con mayor claridad lo que ha sucedido se realiza un cuarto ensayo, el cual se muestra en la figura 4-32.

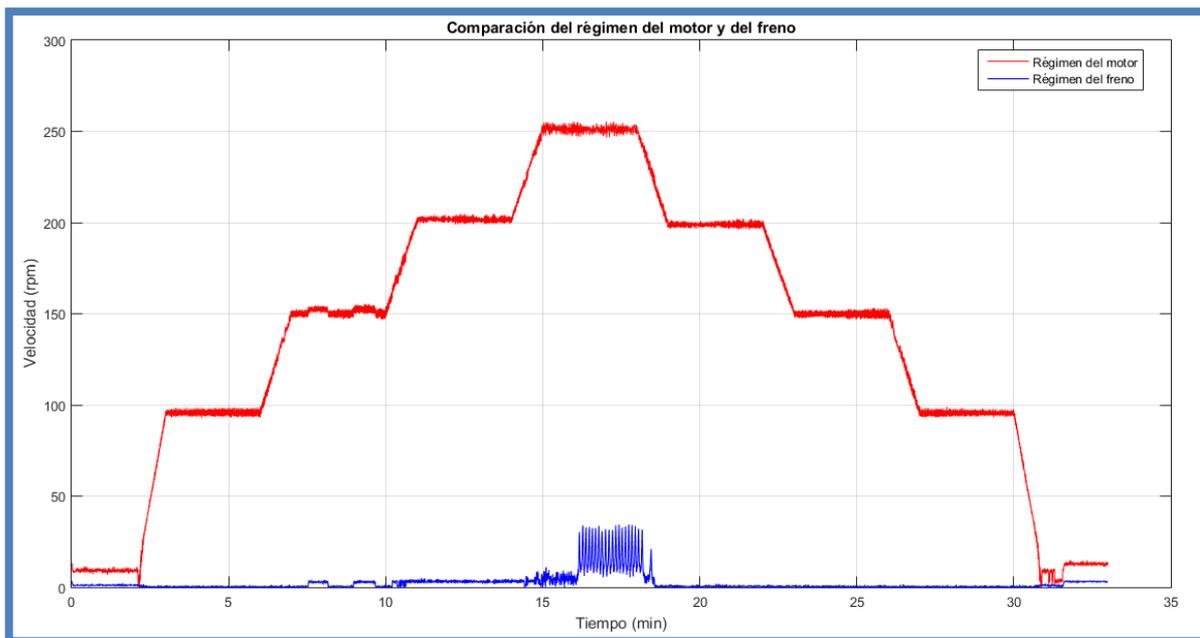


Figura 4-32. Velocidades de entrada y de salida de la caja de cambios en el cuarto ensayo con freno.

Este ensayo es el que, finalmente, tiene una similitud mayor con uno de sus ensayos predecesores. Concretamente con el tercer ensayo que se acaba de analizar. Se tiene de nuevo una interferencia electromagnética en la zona constante de 150 rpm de velocidad del motor, aunque en esta ocasión se da la fase de aceleración y no en la de frenado como en el tercer ensayo. Y en la zona central se vuelve a tener una primera parte de la señal de salida de la caja de cambios similar al segundo ensayo y una segunda parte de la señal similar a la obtenida en el primer ensayo.

Por último, antes de entrar a valorar las conclusiones, se representa la señal de salida de la caja de cambios de los cuatro ensayos para tener una comparación directa entre ellas en la figura 4-33. También se incluye de forma orientativa la señal de entrada recogida durante el primer ensayo. Además, se presenta una imagen ampliada de la zona central donde se concentra la información más importante de esta serie de ensayos en la figura 4-34.

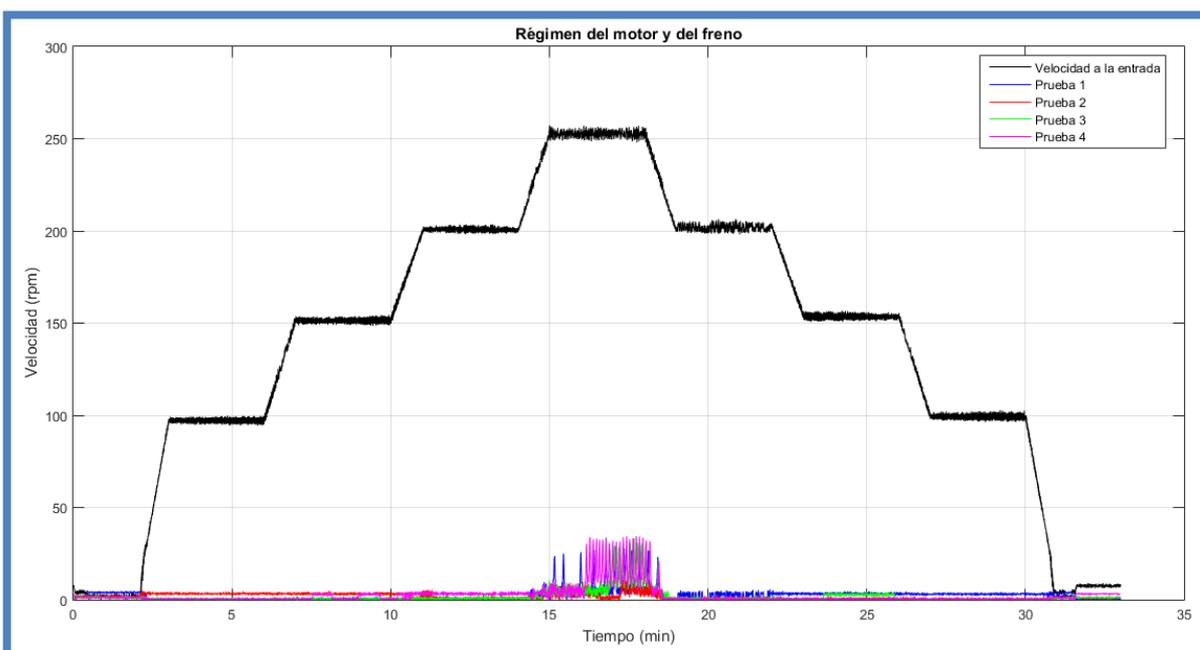


Figura 4-33. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos con freno.

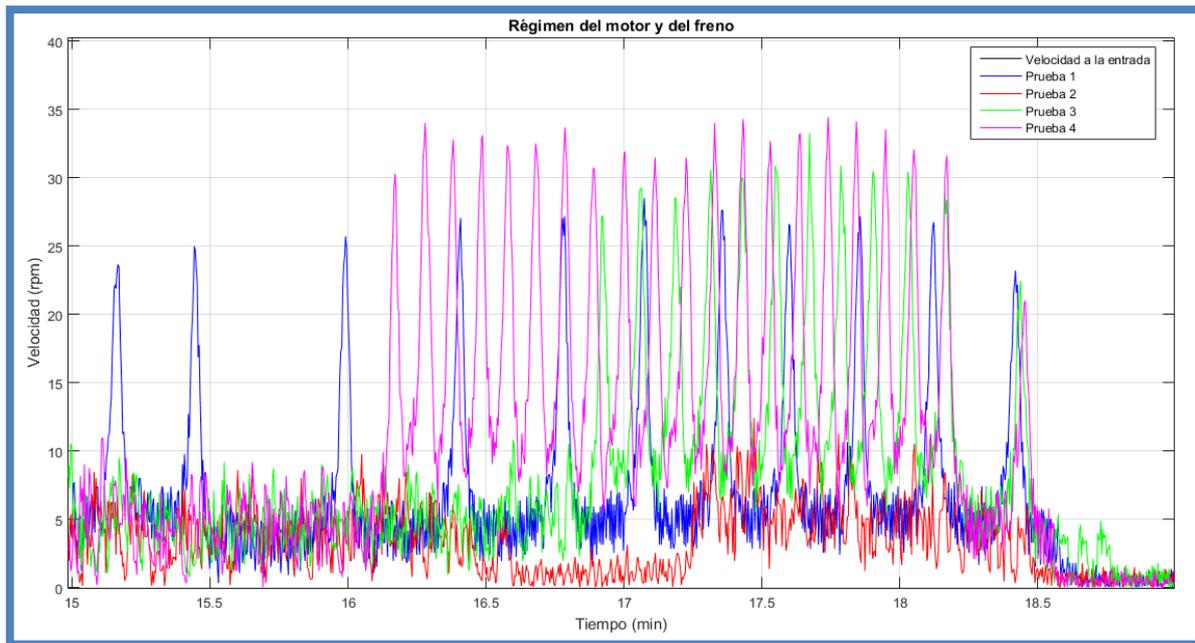


Figura 4-34. Ampliación de la zona central de la velocidad de salida de la comparativa de ensayos con freno.

Como se puede verificar en estas figuras, los ensayos primero y segundo son muy diferentes entre sí, mientras que el tercer y cuarto ensayo son muy similares entre ellos y guardan parte de similitud con los dos primeros ensayos como se ha descrito anteriormente.

Solo falta señalar que la zona donde la velocidad de salida se comporta con una forma de picos y valles comienza antes en el cuarto ensayo en comparación con el tercer ensayo, con el que guarda más similitudes. Además, los valores máximos de estas velocidades van aumentando a medida que se van realizando los ensayos (primero, tercero y cuarto) como ya ocurriera en los ensayos con el freno inactivo.

#### 4.4.1.3.2 Conclusiones de los ensayos con freno

Las conclusiones que se pueden extraer de estos ensayos son las más dificultosas de razonar hasta el momento debido a la disparidad de los resultados obtenidos. Si bien se tiene consciencia de que esto puede ocurrir a la hora de realizar pruebas experimentales, no se puede obviar que los datos recopilados en estos ensayos no han seguido siempre el mismo patrón reconocible como en casos anteriores.

Aún así, si se pueden obtener algunas conclusiones que pueden ser valiosas al final del estudio. La primera de ellas, como ya se había adelantado con anterioridad, es la gran diferencia que se obtiene al ensayar la caja de cambios con el freno inactivo y activo. Esto es debido al campo electromagnético que se genera en el interior del freno que da lugar a un par resistente mayor que hay que superar para comenzar a tener movimiento en la salida de la caja de cambios.

Además, se mantiene la tendencia que se tenía hasta ahora de que a medida que se realizan ensayos los valores máximos de la velocidad aumentan al calentarse los elementos de lubricación de la caja de cambios. Esto solo puede verse comparando los ensayos donde se tienen picos y valles, es decir, en los ensayos uno, tres y cuatro, ya que en las zonas de menor velocidad la diferencia entre sus valores es prácticamente nula y se superponen las señales de los tres ensayos.

Esta forma de picos y valles que adopta la velocidad de salida de la caja de cambios se puede deber a dos causas: una es la naturaleza del freno y otra son las ruedas libres.

El freno está formado por cuatro pares de polos que están alimentados por una corriente trifásica alterna. La corriente que pasa por estos polos (bobinados) es la que genera el campo electromagnético resistente que tiene que superar la salida. Mientras que la salida intenta superar uno de los campos generado por los polos la velocidad es menor, es decir, se tiene un valle. Cuando consigue superar este par resistente se produce una aceleración hasta encontrarse de nuevo con el siguiente campo que se opone al movimiento. Este instante de aceleración es el que puede dar lugar a los picos en la señal de la velocidad.

Otra posible explicación es la de la naturaleza de las ruedas libres del mecanismo rectificador. Aunque en la sección 4.1 se representó el comportamiento ideal del rectificador en la figura 4-11, realmente hay un pequeño desfase de tiempo entre que se deja de engranar una de las ruedas y engrana la siguiente. Este pequeño desfase puede dar lugar también al comportamiento descrito. Para conocer con certeza cuál de las explicaciones es la correcta habría que analizar el periodo de la señal. Sin embargo, dado que se desconoce la construcción de los motores en detalle y que esta conclusión ha quedado abierta, puede ser objeto de un proyecto de estudio futuro.

Por último, y dado que son los resultados que guardan mayor semejanza, se deduce que la forma típica que adopta la evolución de la velocidad de salida es la que se corresponde con los ensayos tres y cuatro. Sin embargo, también existen puntos en común entre estos ensayos con los dos primeros, pero no se ha encontrado la causa de que se dé un comportamiento u otro de la salida de la caja de cambios.

#### 4.4.2 Ensayos bloqueando en primer tren de engranajes del rectificador

Se han realizado los ensayos de la caja de cambios funcionando con la rectificación sin ninguna modificación. Ahora llega el turno de llevar a cabo las pruebas bloqueando uno de los trenes de engranajes. Para ello se va a diseñar un mecanismo que bloquee el primer eje y se modificará el eje de salida para retirar la rueda dentada del eje que se va a bloquear. De esta forma no habrá ningún momento resistente añadido que pase por este tren de engranajes, ya que se quiere obtener los resultados cuando sólo funciona un tren de engranajes sin ninguna influencia del otro tren.

##### 4.4.2.1 Montaje, diseño y fabricación del mecanismo de bloqueo

Los detalles pormenorizados de todos los pasos se encuentran en el anexo B. Finalmente se llega a instalar el mecanismo que se muestra en la figura 4-35.

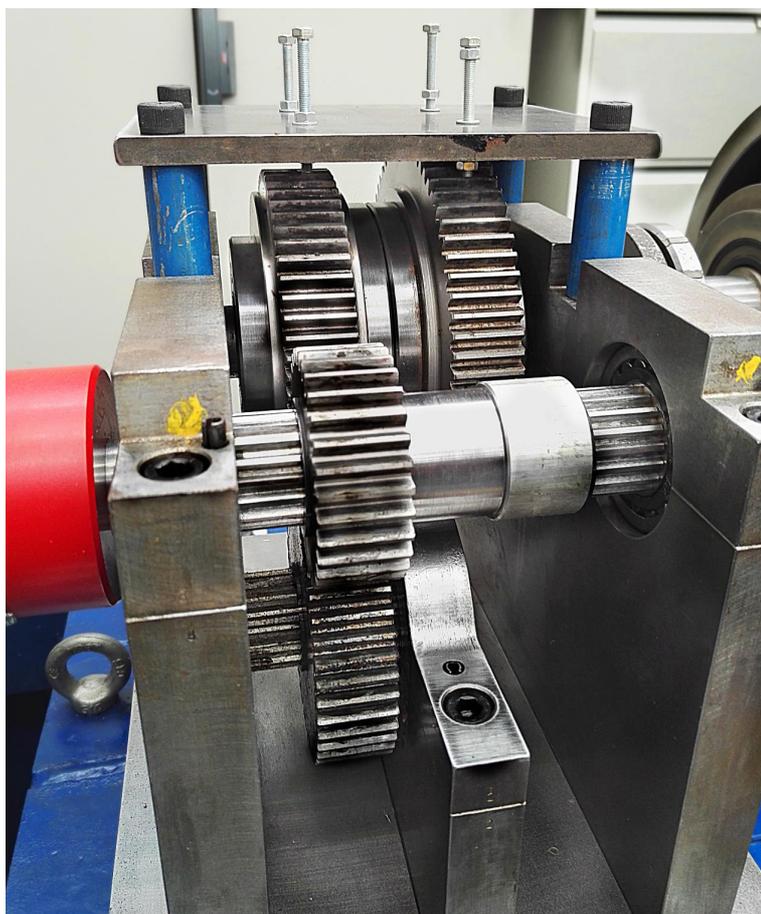


Figura 4-35. Reductora con el mecanismo de bloqueo instalado.

#### 4.4.2.2 Ensayos con el freno inactivo

Se pasa ahora a realizar los ensayos con esta disposición de la caja de cambios. El procedimiento de ensayos es el mismo que se ha seguido en la caja de cambios con el rectificador funcionando sin modificaciones. Se realizan varios ensayos en primer lugar con el freno inactivo. Se van a representar los resultados de todos los ensayos conjuntamente en las figuras 4-36 y 4-37, ya que en la configuración anterior ya se representaron y analizaron todos los ensayos por separado.

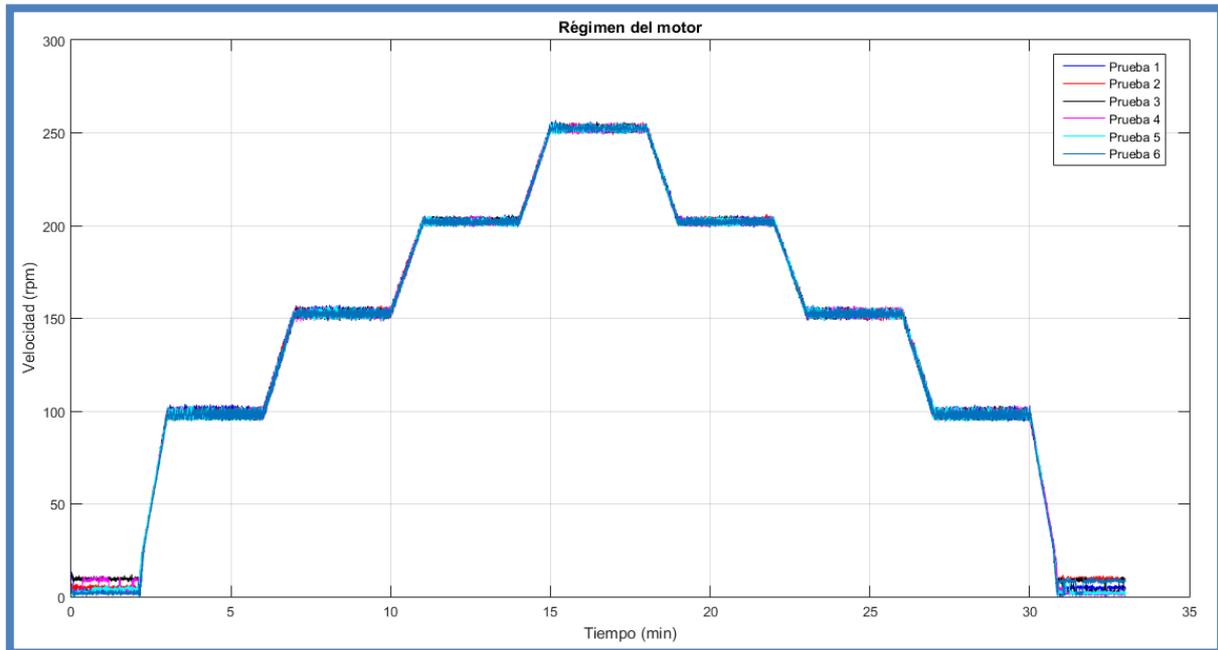


Figura 4-36. Comparativa de velocidades a la entrada de la caja de cambios en la serie de ensayos.

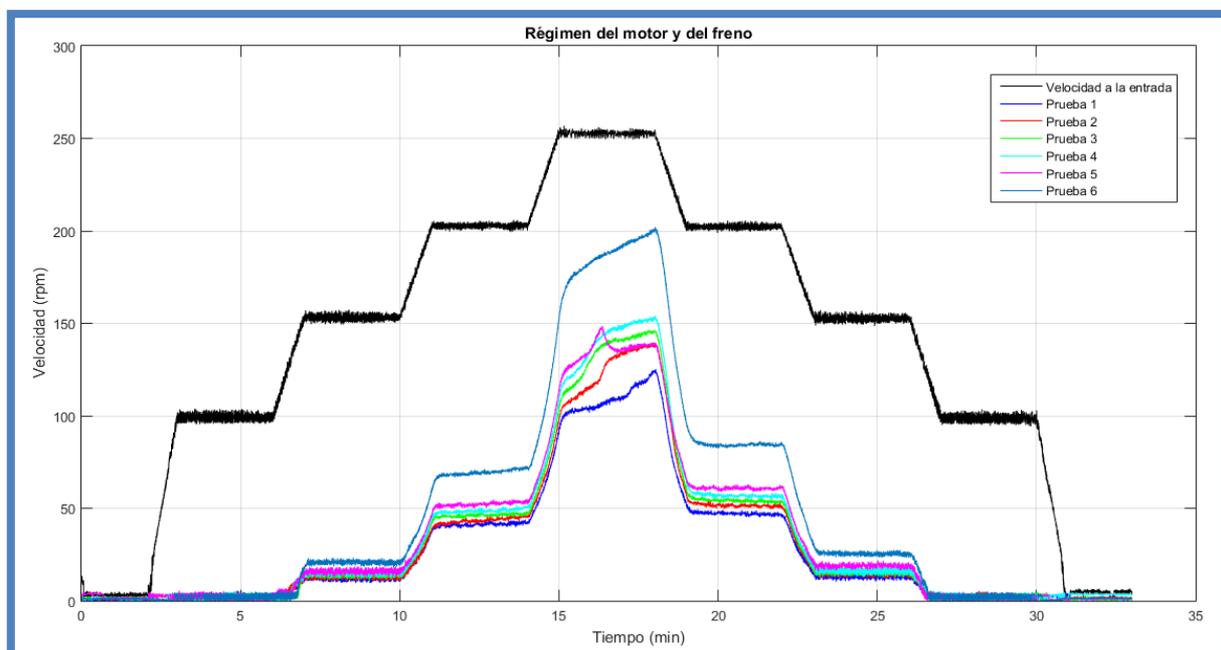


Figura 4-37. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos.

Las velocidades recogidas por el medidor de par, como está ocurriendo en todos los ensayos, coinciden en todos los ensayos salvo la pequeña desviación al comienzo y al final de las pruebas, lo cual se ha analizado anteriormente.

En cuanto a las velocidades de salida, se pueden ver en general un comportamiento similar al que se obtuvo en los ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones. Pero en alguno de ellos hay discrepancias.

Una de ellas es un aumento de la velocidad de salida más brusco de lo habitual cuando se alcanza la velocidad de 250 rpm en el motor. Si se fija la atención en la figura 4-37, concretamente en la forma que adopta la curva de la velocidad en la segunda prueba, un minuto después de que se hayan alcanzado las 250 rpm en el motor (en el minuto 16), se puede observar una aceleración que no se corresponde con la forma que la respuesta adoptaba en los ensayos de la configuración anterior. Esta aceleración se puede detectar también en los ensayos 3 y 4, aunque de una forma menos acusada.

Y si hay una diferencia que destaca por encima del resto es el comportamiento que se puede ver de la prueba cinco. En este ensayo, en un instante de tiempo idéntico al de las aceleraciones que se acaban de describir, la salida tiene su máximo valor (un pico) y no continúa aumentando su velocidad como siempre había ocurrido hasta el momento. De hecho, sus valores se sitúan por debajo de las curvas de velocidad del tercer y cuarto ensayo, y casi a la par de la curva del segundo ensayo. Una vez se comienza a frenar el ensayo, la curva vuelve a recuperar su forma y valores habituales, es decir, por encima del cuarto ensayo.

Para finalizar este análisis se puede observar fácilmente que, a pesar de haber realizado 6 ensayos, no se ha conseguido superar en ningún momento la relación de transmisión 1, como sí ocurriera en los ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones. Para ilustrar mejor esta diferencia se va a representar en la figura 4-38 los resultados de la velocidad de salida de una serie de ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones frente a los resultados que se acaban de obtener en esta serie de ensayos con el primer tren de engranajes bloqueado. Los resultados de cada serie están expuestos de un mismo color, de forma que se puedan diferenciar bien las series de ensayos.

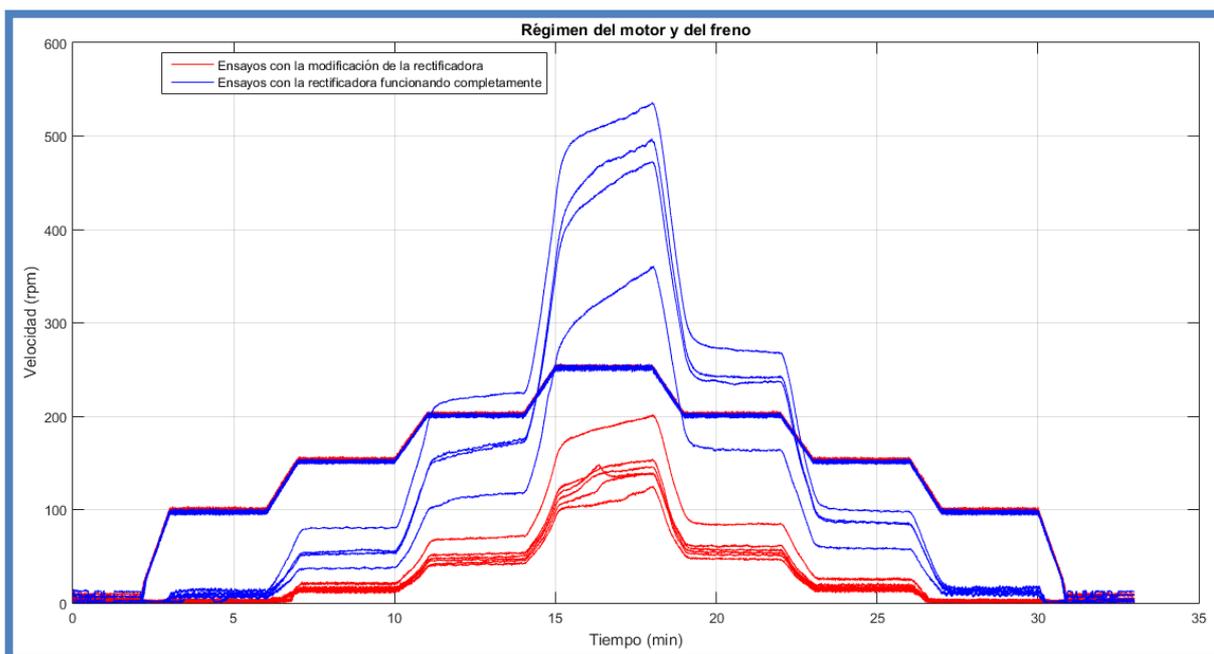


Figura 4-38. Comparación de velocidades en ensayos con y sin modificación de la reductora.

#### 4.4.2.3 Conclusiones de los ensayos de la primera modificación con el freno inactivo

En lo referente a las conclusiones que se pueden deducir de estos ensayos, la primera y más evidente es la que se ha comentado en referencia a la figura 4-38 en la que puede verse como con la caja de cambios funcionando sin modificaciones se tienen relaciones de transmisión por encima de la unidad, mientras que con el primer tren de engranajes bloqueado nunca se supera la barrera de la unidad. Parece lógico pensar que durante la conducción de un vehículo habrá momentos en los que será necesario que la relación de transmisión sea superior a la unidad. Si se pone como ejemplo un choche utilitario de cinco marchas manuales, usualmente la cuarta marcha tiene una relación unidad y la quinta una relación superior.

También se han encontrado comportamientos en la velocidad de salida que no se habían identificado hasta ahora. Las aceleraciones del segundo, tercer y cuarto ensayo pueden deberse a un aumento repentino de la temperatura que disminuya el par resistente que se opone al movimiento de salida. Sin embargo, es poco probable que esta sea la causa de esta diferencia, ya que se dan siempre en el mismo instante de tiempo y no en todos los ensayos. Además, en el quinto ensayo se tiene un comportamiento totalmente distinto a las pruebas realizadas hasta el momento con la caja de cambios a partir de ese mismo instante de tiempo. Esto hace indicar que hay algún elemento que está influyendo en las pruebas a partir de ese instante entre 16 y 16,5 minutos. Sin embargo, y dado que solo aparece en algunos ensayos, no se ha encontrado la causa que origina estas discrepancias. Dado que este punto de la conclusión ha quedado abierto, puede ser objeto de un futuro estudio realizando más ensayos.

#### 4.4.2.4 Ensayos con el freno activo

Una vez realizados los ensayos con el freno inactivo se pasa a realizar los ensayos con el freno activo siguiendo el procedimiento para realizar las pruebas. Sin embargo, la salida se mantiene siempre en bloqueo durante todo el ensayo.

Es fácil deducir en base a los ensayos realizados con el freno inactivo que, si en éstos las velocidades de salida eran muy inferiores a las obtenidas en los ensayos con el rectificador funcionando a pleno rendimiento, en los ensayos con el freno activo en los que con el rectificador funcionando completamente se obtenían velocidades muy bajas y concentradas en la zona central del ensayo, la velocidad con el primer tren de engranajes bloqueados sea nula.

#### 4.4.3 Ensayos bloqueando el segundo tren de engranajes

##### 4.4.3.1 Motaje de la nueva modificación

Todos los pasos detallados para llegar al montaje final que se muestra en la figura 4-39 se encuentran en el anexo C de este proyecto.

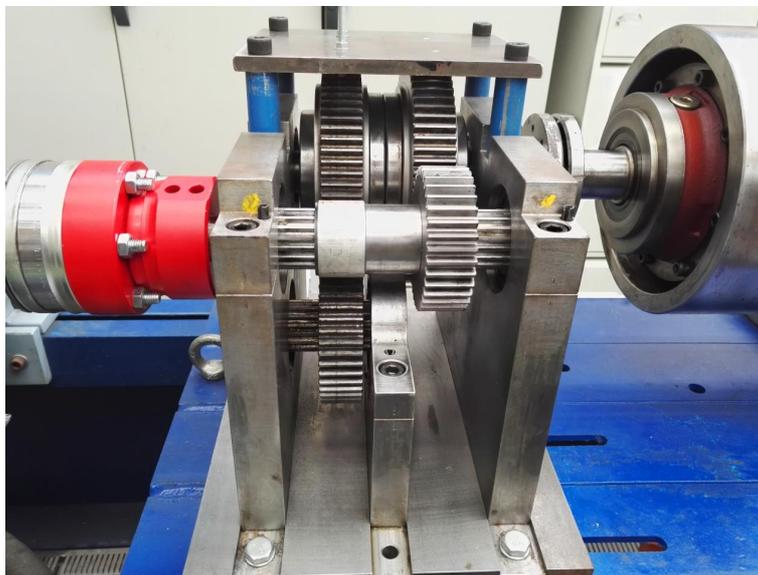


Figura 4-39. Rectificador con el segundo tren de engranajes bloqueado.

Una vez terminado el montaje se realizan los ensayos. Se vuelve a seguir el procedimiento que se ha descrito en los ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones y que también se ha seguido con la primera modificación de la reductora.

Como hipótesis de partida se aume que los resultados van a ser similares a los obtenidos en la sección 4.4.2, ya que la relación de transmisión que introduce esta segunda modificación es idéntica a la que se tenía en la primera modificación y la curva de comportamiento del mecanismo de cuatro barras visto en la figura 4-5 es simétrico.

#### 4.4.3.2 Primera serie de ensayos con el freno inactivo

En primer lugar, se realizan los ensayos con el freno inactivo. En la primera serie se tiene que hacer una parada tras el tercer ensayo ya que se detecta que uno de los tornillos que fijaba la rueda libre del segundo tren de engranajes había fallado y se había roto. A pesar de este percance se pudieron obtener los datos de los ensayos y se representan en la figura 4-40 y en la figura 4-41.

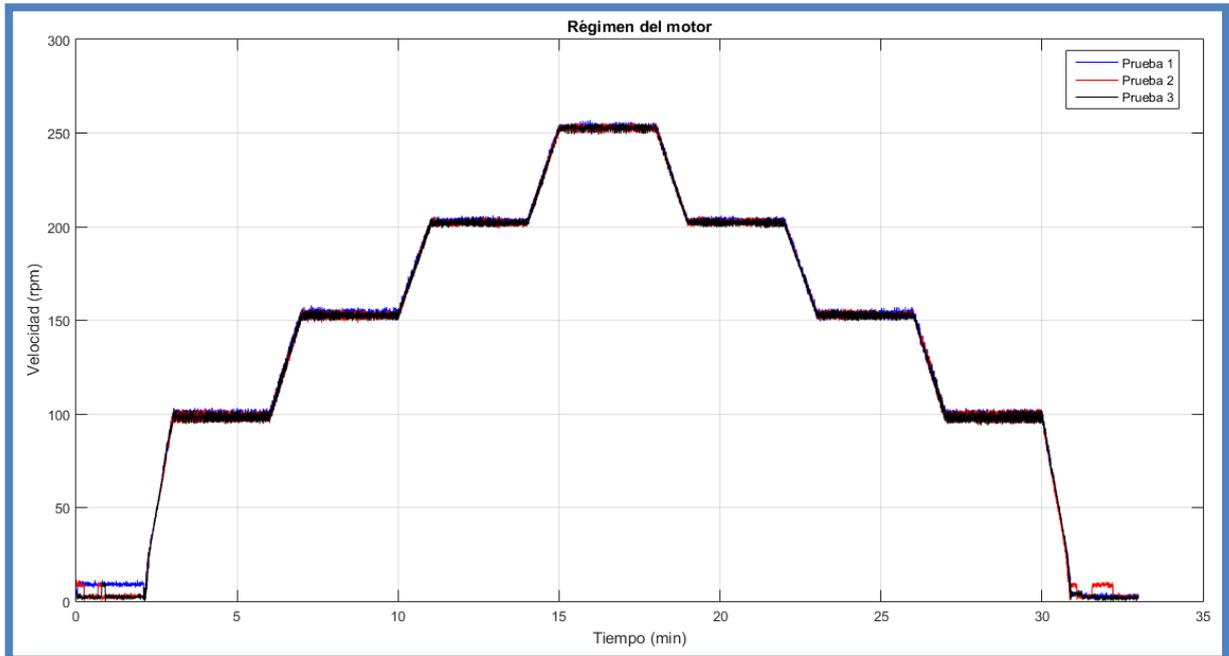


Figura 4-40. Velocidades de entrada de la caja de cambios con el segundo tren de engranajes fijado.

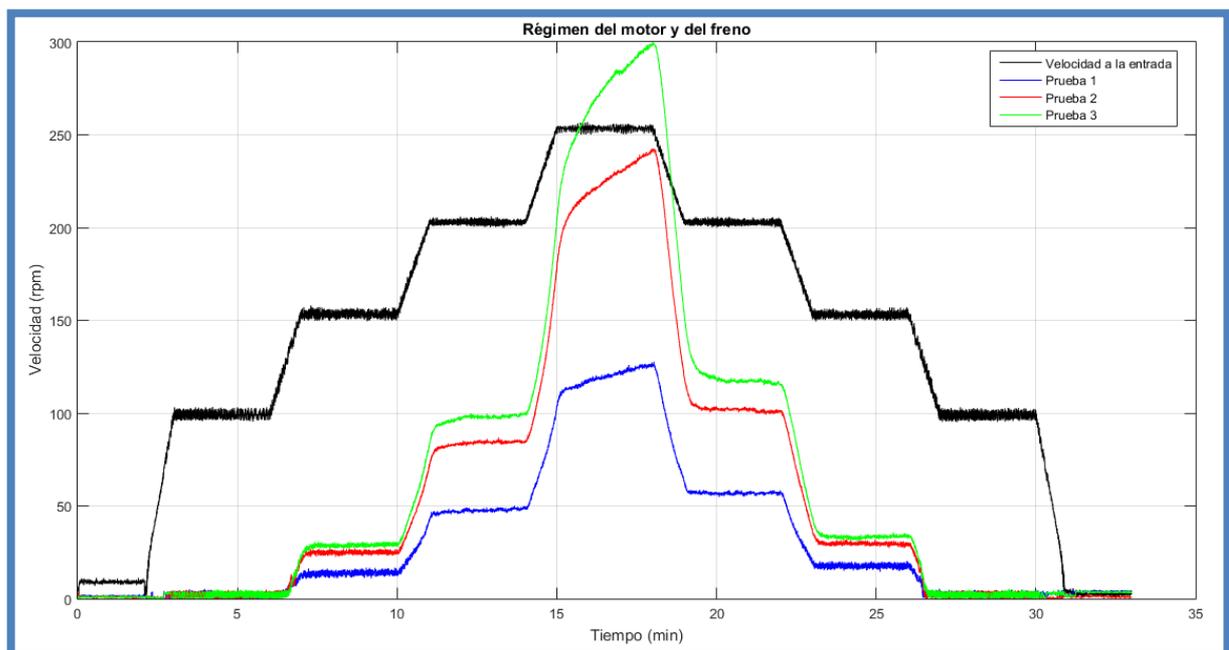


Figura 4-41. Velocidades de salida de la caja de cambios con el segundo tren de engranajes fijado.

En esta ocasión las formas de las curvas tanto de la velocidad del motor como de las velocidades a la salida de la caja de cambios siguen las mismas pautas que en el caso del primer montaje con el rectificador sin modificaciones.

### 4.4.3.3 Reparaciones

Como se ha comentado en la sección 4.4.3.2 la rotura de uno de los tornillos hizo necesarias realizar algunas reparaciones y modificaciones que se encuentran en el anexo D.

### 4.4.3.4 Segunda serie de ensayos con el freno inactivo

Una vez realizadas estas modificaciones se vuelve a realiza una serie de ensayos para comprobar que los resultados de la serie anterior no se han visto influenciados por la rotura del tornillo. Los resultados de esta serie se pueden ver en la figura 4-42 y en la figura 4-43.

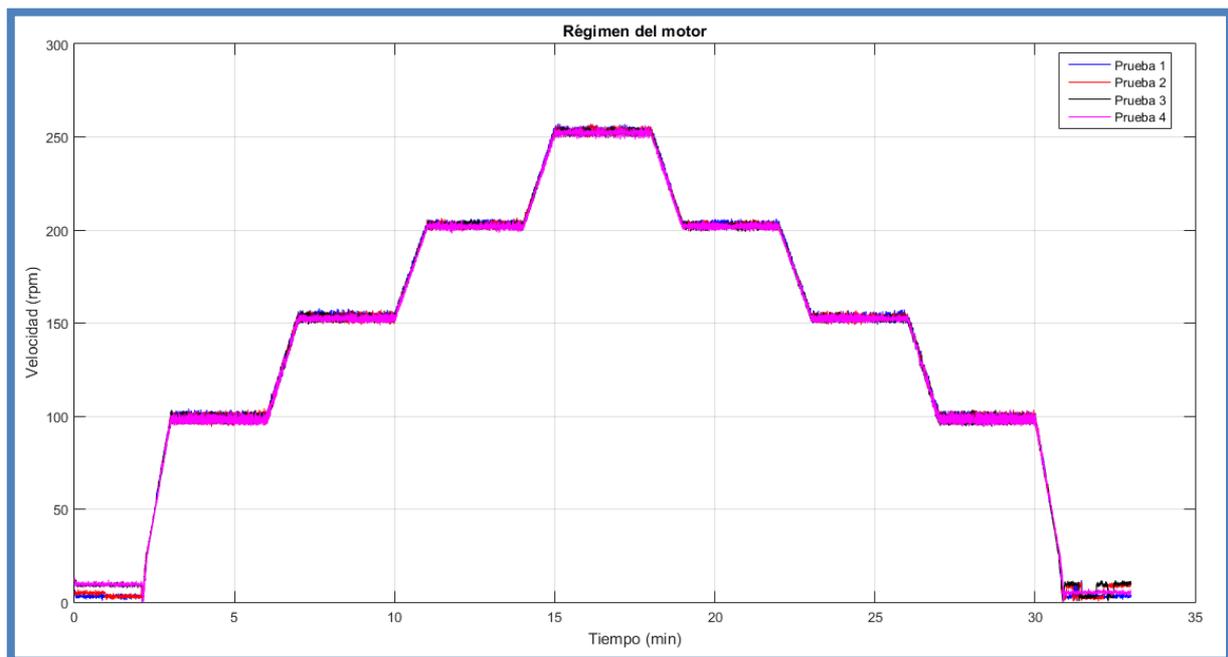


Figura 4-42. Velocidades de entrada de la caja de cambios tras las reparaciones en el rectificador.

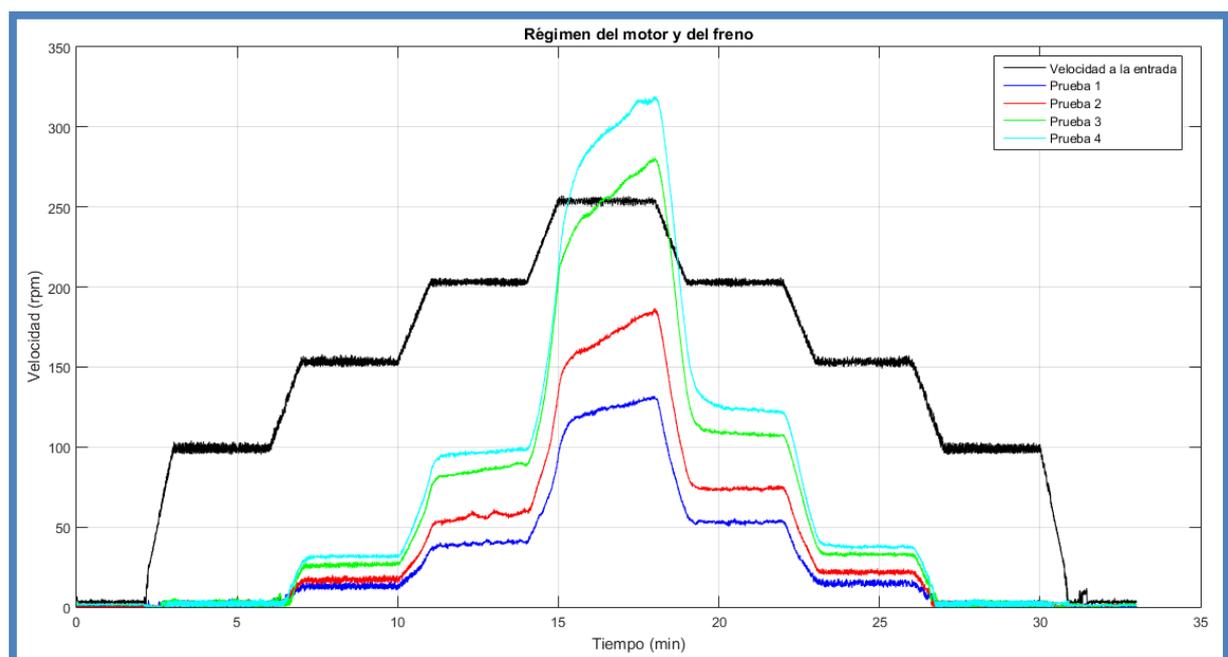


Figura 4-43. Velocidades de salida de la caja de cambios tras las reparaciones en el rectificador.

De nuevo se vuelven a cumplir las formas de las curvas obtenidas en los ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones y son coherentes con los obtenidos en la anterior serie de ensayos. De modo que la rotura del tornillo no ha tenido influencia en los ensayos.

Una vez constatado esto se van a realizar las comparaciones de los resultados tanto con los obtenidos con el rectificador funcionando sin modificaciones como con los obtenidos con el primer tren de engranajes bloqueados. En primer lugar, se realiza la comparación con los resultados obtenidos en una de las series de ensayos de la caja de cambios funcionando con el rectificador sin modificaciones. Dicha comparativa se muestra en la figura 4-44. Tras esta comparativa, se realiza la verificación de los resultados obtenidos en una serie de cada modificación efectuada al rectificador, la cual se muestra en la figura 4-45.

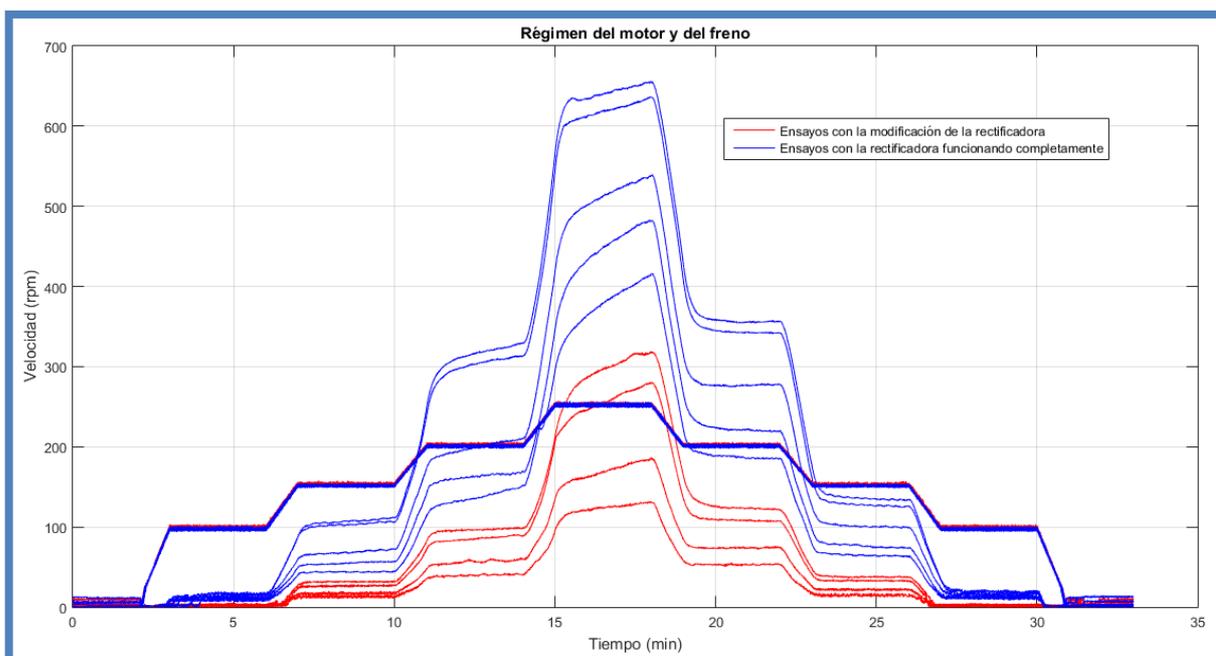


Figura 4-44. Comparación de velocidades en ensayos con y sin modificación de la reductora.

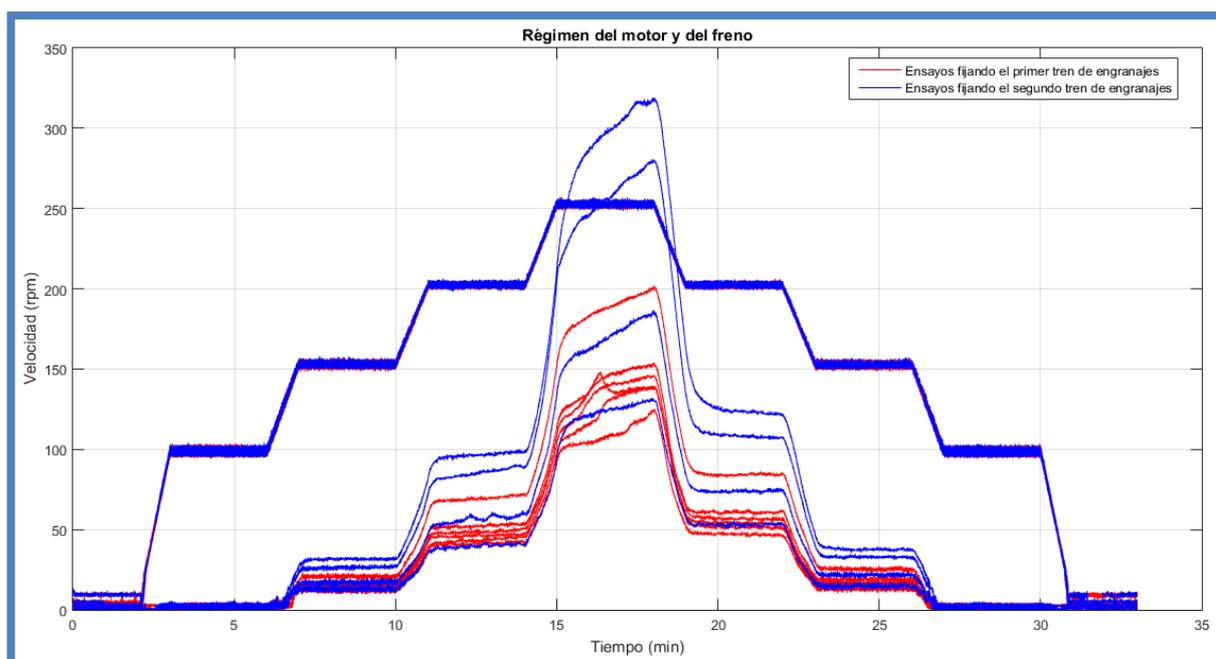


Figura 4-45. Comparación de velocidades en ensayos con la primera y la segunda modificación de la reductora.

#### 4.4.3.5 Conclusiones de los ensayos de la segunda modificación con el freno inactivo

Como se puede apreciar en estas comparativas, los resultados de esta modificación a pesar de ser inferiores en velocidad de salida a los obtenidos en los ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones, son muchos más cercanos a estos valores que a los obtenidos con la primera modificación. Además, en esta segunda modificación la forma de las curvas de la velocidad de salida sigue el mismo patrón que las obtenidas en las pruebas con el rectificador sin modificaciones, mientras que difieren en varias curvas de la serie de ensayos realizados con la primera modificación.

Estas diferencias entre el rectificador sin modificaciones y el rectificador modificado, y las diferencias entre las dos modificaciones se deben a que las relaciones de transmisión con el rectificador modificado son más altas (tendremos un par disponible menor) y como el prototipo está diseñado para trabajar a bajas potencias, es muy sensible al par resistente y no es capaz de mover adecuadamente al freno.

Para finalizar las conclusiones de esta serie de ensayos, se puede ver en la figura 3-46 que con esta modificación del rectificador se vuelve a tener relaciones de transmisión mayores de uno en ciertos instantes y tras varios ensayos. Esto se acerca un poco más a una situación real de conducción de un vehículo de lo que lo hacía la primera modificación. Sin embargo, la situación ideal es que se pueda llegar a tener relaciones de transmisión superiores a la unidad desde la primera prueba, como ocurre con la serie de ensayos del rectificador funcionando sin modificaciones. Por ello es indispensable que el rectificador funcione sin modificaciones, ya que sin él no se tendría un comportamiento adecuado de la CVT para la conducción de un vehículo.

#### 4.4.3.6 Ensayos con el freno activo

Al contrario de lo ocurrido en los ensayos de la primera modificación de la reductora bloqueando el primer tren de engranajes, donde se tenía un bloqueo en la salida en los ensayos con el freno activado, en esta segunda modificación se obtiene movimiento a la salida de la caja de cambios.

Se realizan los ensayos según el procedimiento habitual de la caja de cambios con el freno activo. Los resultados de esta serie de ensayos se pueden ver en la figura 4-46, en la figura 4-47 y en la figura 4-48.

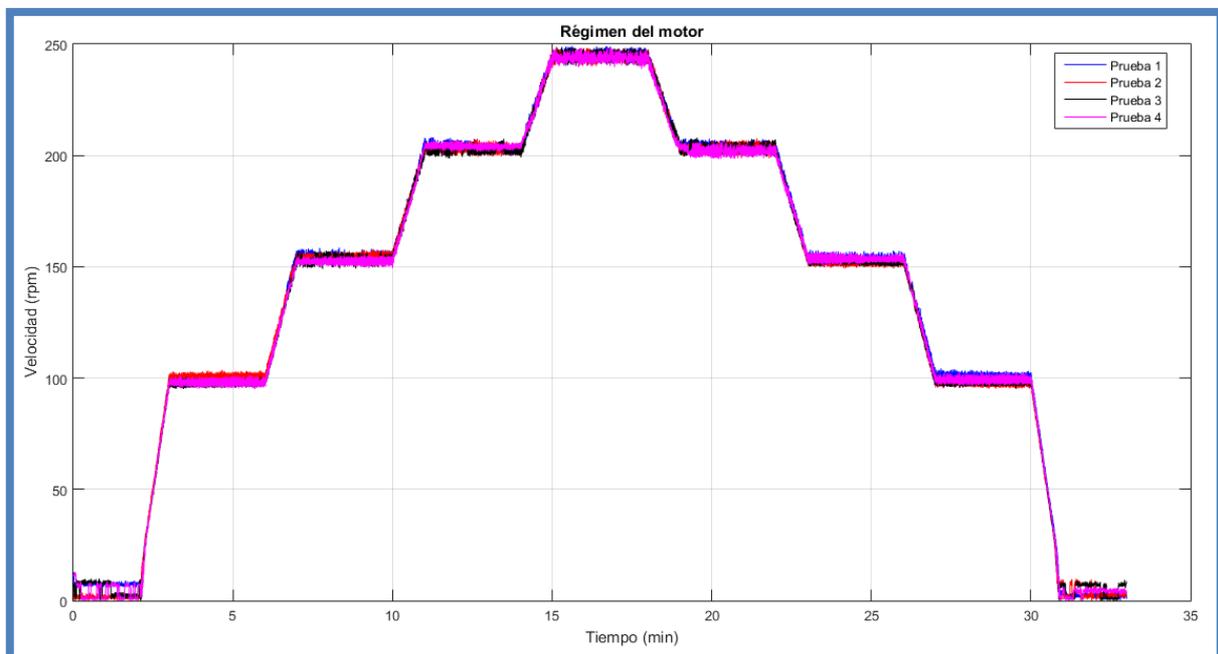


Figura 4-46. Comparativa de velocidades a la entrada de la caja de cambios en la serie de ensayos.

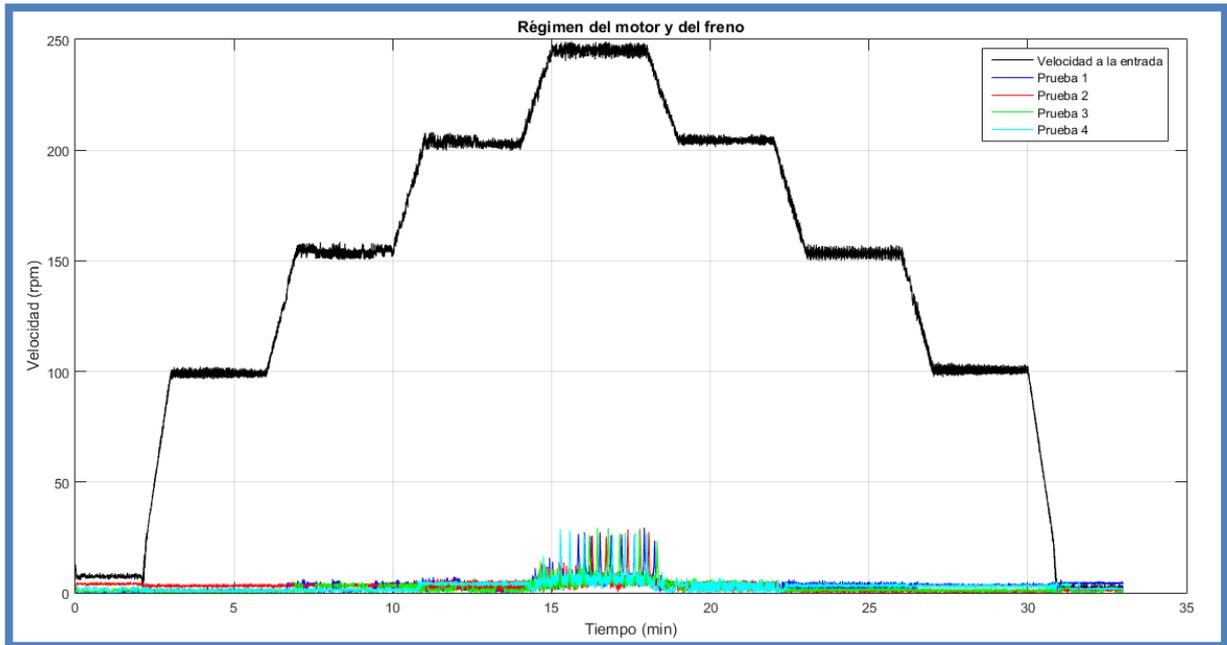


Figura 4-47. Comparativa de velocidades a la salida de la caja de cambios en la serie de ensayos.

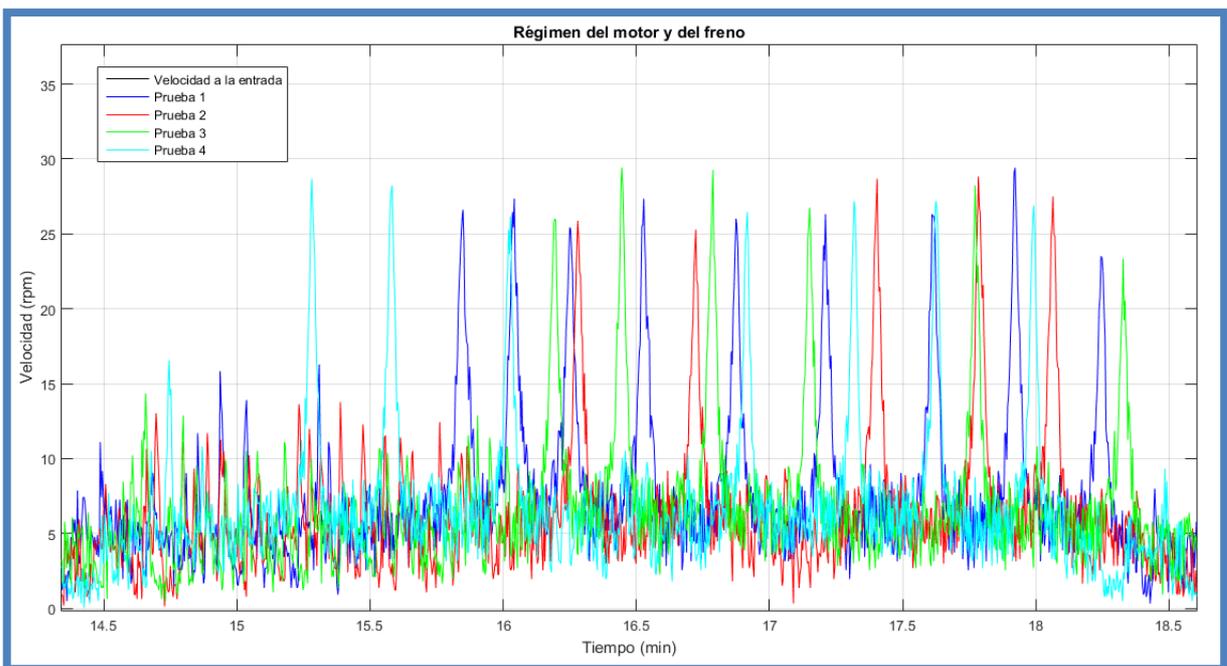


Figura 4-48. Ampliación de la zona central de las velocidades de salida de la figura 3-50.

Los datos recogidos por el medidor de par del motor coinciden en todas las pruebas. También se puede apreciar que sólo hay movimiento en la salida a partir de la subida de la velocidad del motor a 250 rpm y finaliza tras la bajada a 200 rpm. Adicionalmente, se puede apreciar que la velocidad de salida tiene una forma similar en todos los ensayos a excepción del momento en el que comienza el tramo de velocidad con forma clara de picos y valles. El instante de tiempo se va adelantando a medida que se van sucediendo los ensayos.

Para completar el análisis de esta serie de ensayos se van a comparar los resultados de las velocidades con los obtenidos en los ensayos con el rectificador funcionando con la primera y con la segunda modificación con el freno activo en ambas. Esta comparativa puede verse en la figura 4-49.

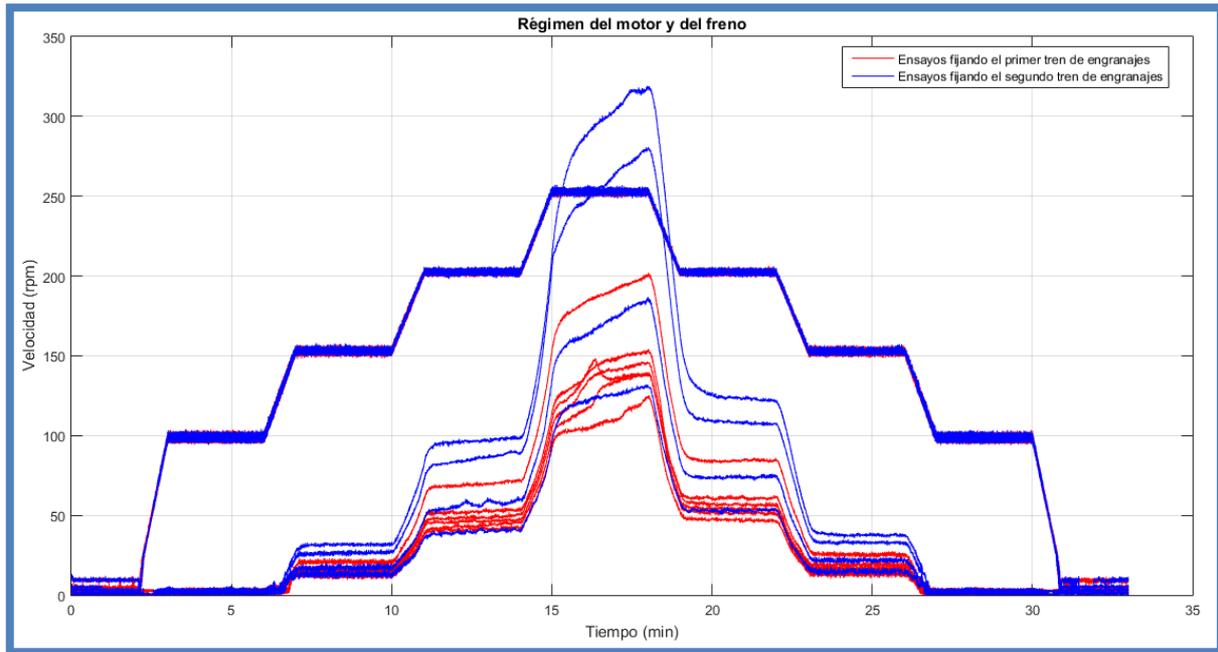


Figura 4-49. Comparación de velocidades en ensayos con la primera y la segunda modificación de la reductora con el freno activo.

#### 4.4.3.7 Conclusiones de los ensayos de la segunda modificación con el freno activo

De esta comparativa se pueden extraer unas conclusiones similares a las obtenidas en las comparativas de los ensayos sin freno. Los valores de la velocidad de salida son algo inferiores en el caso de la modificación que en el caso del rectificador sin modificaciones.

Sin embargo, las formas de las curvas de la velocidad de salida de la serie de ensayos con la segunda modificación son muy similares entre sí como se analizó en la figura 3-51, cosa que no ocurre en el caso de la serie de ensayos con el rectificador funcionando sin modificaciones. Además, el comportamiento de las curvas de velocidad de salida del rectificador con la segunda modificación guarda mucha semejanza al comportamiento que se obtuvo en las dos últimas pruebas de la serie de ensayos con el rectificador sin modificaciones.

Este comportamiento consiste en una primera zona de velocidad baja pero aproximadamente constante y una segunda zona de velocidad con una forma de picos y valles. La causa de esta forma de picos y valles se explicó anteriormente, en la sección 4.4.1.3.2, a causa de la configuración interior del motor. La segunda zona de velocidad se va adelantando en el tiempo a medida que se van realizando los ensayos.

A raíz de todas estas evidencias se puede concluir que esta es la forma tipo de la curva de velocidad de salida de la caja de cambios cuando el freno está activo.

## 5 ÚLTIMOS ENSAYOS CON LA JUNTA Y CONCLUSIONES FINALES

En el capítulo anterior se han obtenido dos conclusiones muy claras sobre el comportamiento del banco de ensayos que no se habían detectado en las pruebas con la junta. Estas conclusiones son la gran diferencia entre realizar los ensayos con el motor inactivo o activo y el aumento de la velocidad a medida que avanza un ensayo y se van realizando ensayos de forma consecutiva.

Para verificar que estos hechos ocurren también cuando la junta está instalada y por tanto son propias del banco de ensayos y no del elemento ensayado se van a realizar más pruebas con un procedimiento de ensayos similar al que se ha ejecutado con la caja de cambios.

### 5.1 Montaje de la nueva configuración del banco de ensayos

El primer paso es volver al montaje del banco de ensayos con la junta que se detalló en la sección 3.1. Durante este montaje se descubrieron algunos detalles interesantes que se desarrollan con profundidad en el anexo E.

### 5.2 Procedimiento de ensayos

Tras finalizar con la instalación se sigue con la planificación de los siguientes ensayos. En el capítulo dos se realizaron ensayos en los que se aumentaba la velocidad hasta alcanzar las 1000 rpm. Sin embargo, no se realizó una bajada de la velocidad simétrica a la subida, de forma que no se podía apreciar la diferencia entre la subida y la bajada. Además, todos los ensayos del capítulo dos se realizaban encendiendo el freno al comienzo de los ensayos y apagándolo instantes antes de que finalizaran.

Para observar si se producen los fenómenos nombrados al inicio de este capítulo y descritos en el capítulo anterior se han realizado dos series de ensayos en los que la velocidad del motor va a tener la evolución de la figura 5-1. La primera serie de ensayos se realiza con el freno inactivo, mientras que la segunda serie de pruebas se realiza con el freno activo.

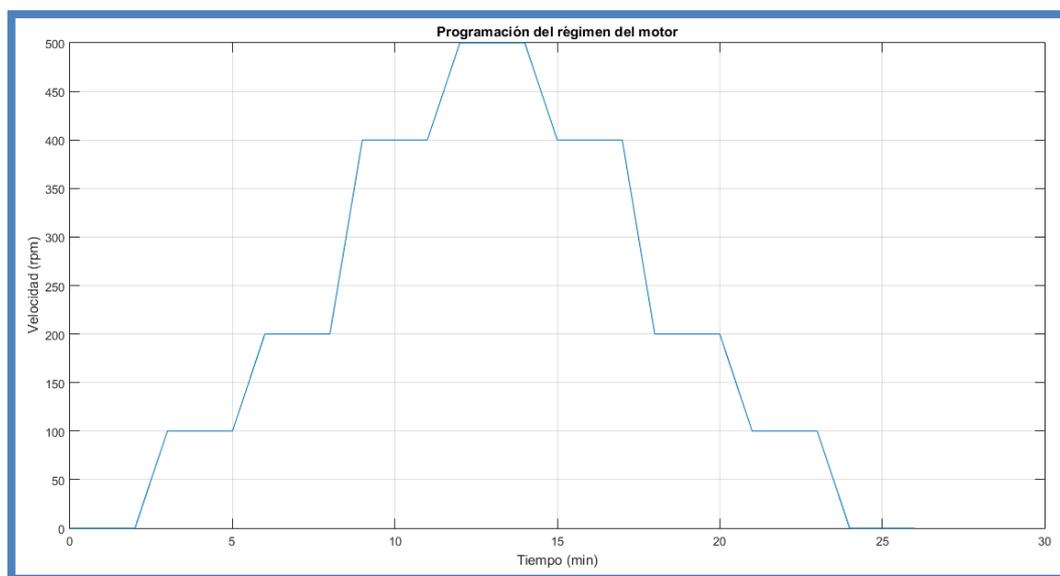


Figura 5-1. Curva programada para la velocidad del motor.

### 5.3 Ensayos con el freno inactivo

En primer lugar, se representa la serie de ensayos realizada con el freno inactivo. En la figura 5-2 se representa los datos recogidos por el medidor de par del motor y en la figura 5-3 los datos recogidos por el medidor de par del freno.

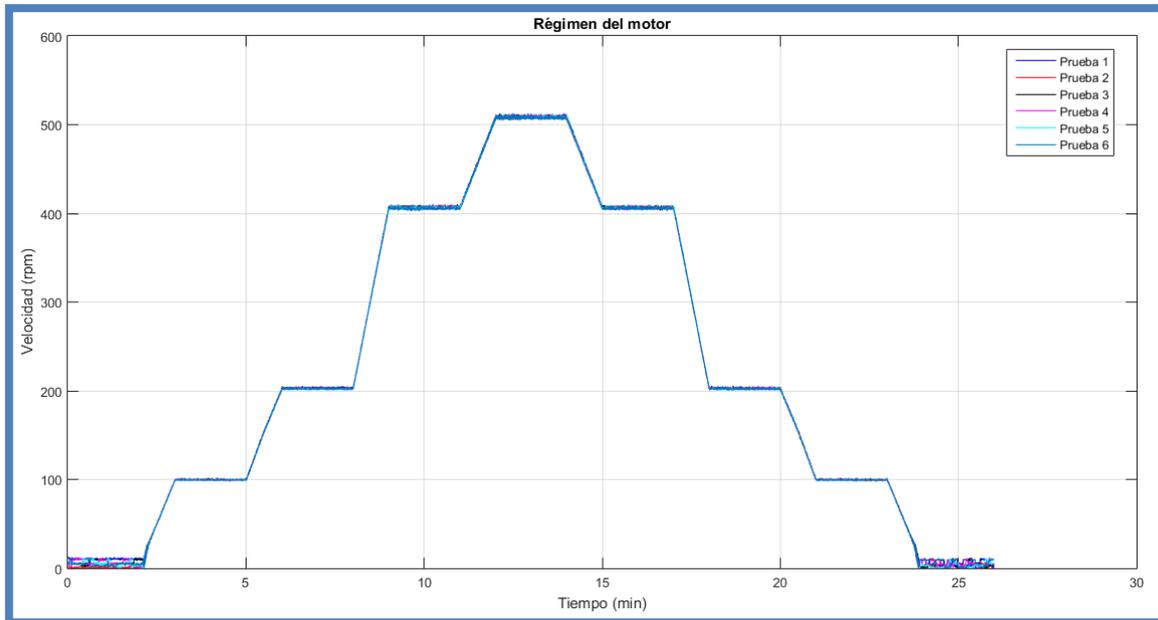


Figura 5-2. Velocidades del motor en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.

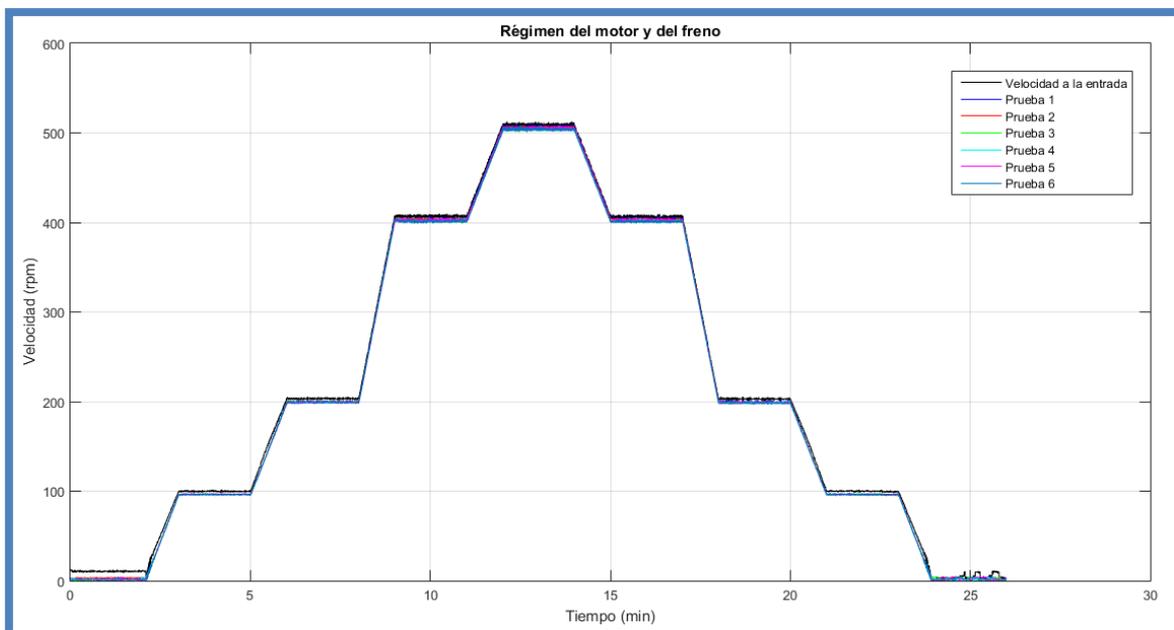


Figura 5-3. Velocidades del freno en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.

Como se puede observar no hay ningún indicio de que las velocidades recogida por los medidores de par aumenten a medida que avanza el ensayo, ni a medida que se van realizando varios ensayos, como sí ocurría en los ensayos realizados con la caja de cambios.

Para mejorar el comportamiento del banco durante estos ensayos se va a representar también el momento registrado por los medidores de par. El par motor se representa en la figura 5-4 mientras que el par de freno se registra en la figura 5-5.

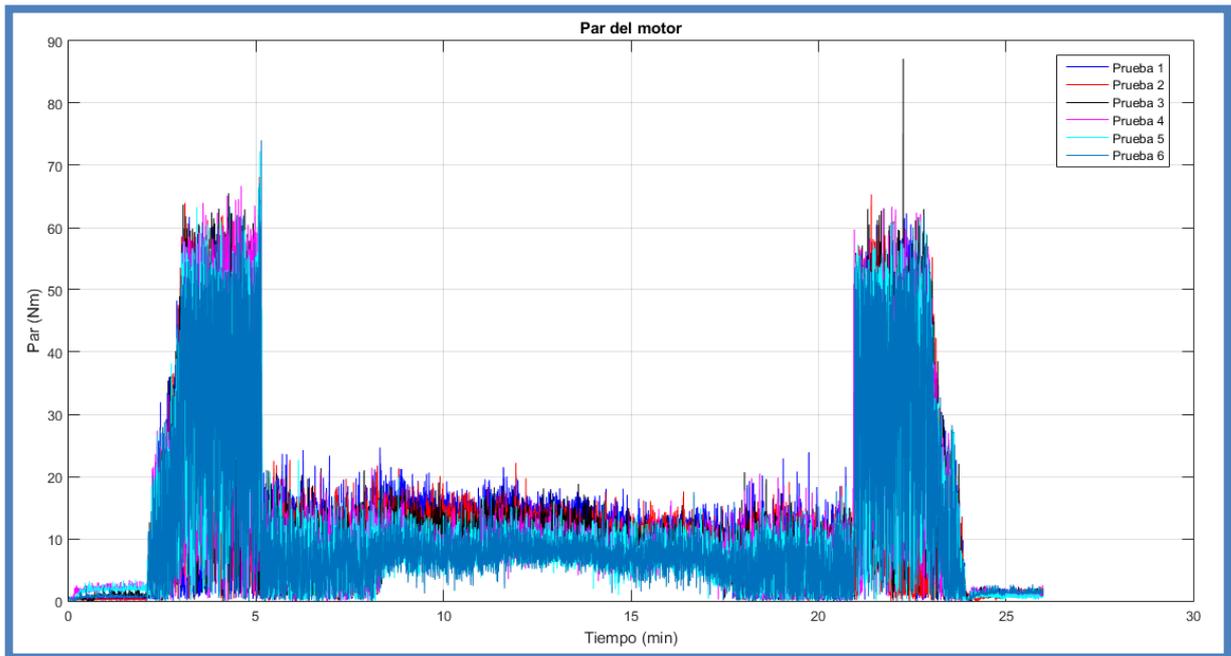


Figura 5-4. Momentos del motor en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.

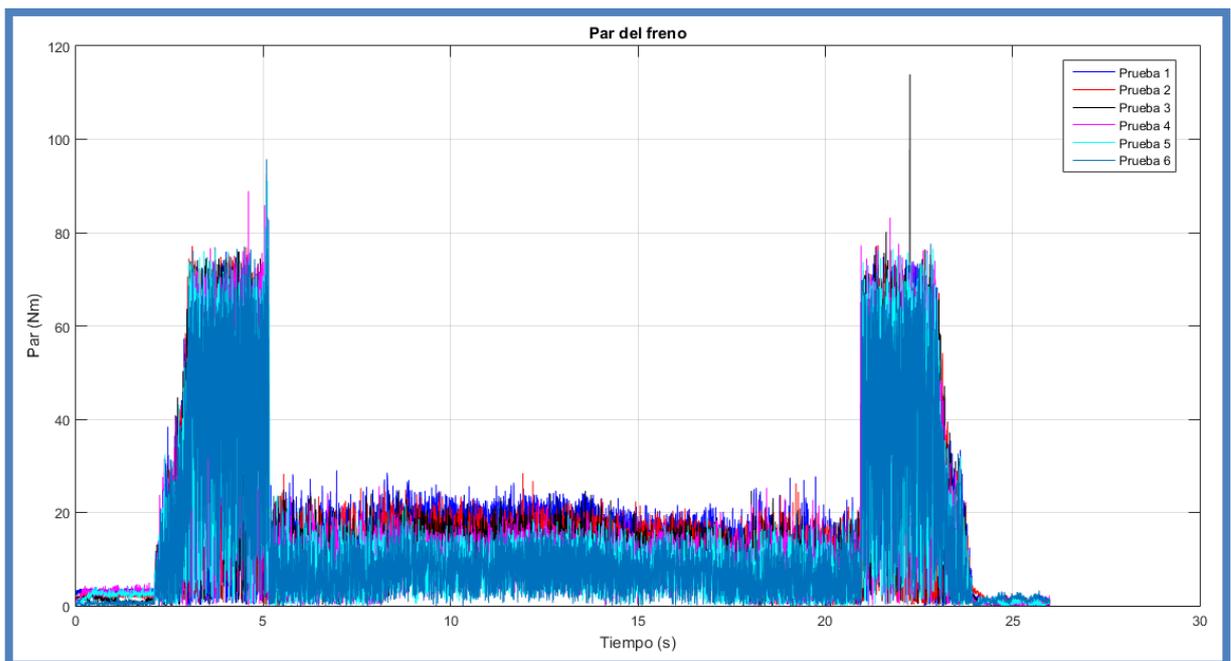


Figura 5-5. Momentos del freno en la primera serie de ensayos con el freno inactivo.

## 5.4 Conclusiones de los ensayos con el freno inactivo

Se aprecian ligeras diferencias en los valores registrados a medida que se van realizando ensayos. A medida que se van realizando más ensayos, los valores del par van decreciendo. Además, también se nota una pequeña tendencia a bajar los valores de los momentos a medida que va avanzando un ensayo, de forma que las curvas de pares no son totalmente simétricas.

Para entender como encajan estos datos con la hipótesis que se formuló acerca de la temperatura del aceite del reductor hay que tener en cuenta las características del elemento que se está ensayando en este caso, que es la

junta, y del banco de ensayos. La junta obliga a que las velocidades de entrada y de salida sean siempre iguales, cosa que no ocurría en el caso de la caja de cambios. Además, en esta configuración, el motor va a variar el par y la potencia suministrada para mantener la velocidad que se ha programado. De forma que al aumentar la temperatura del aceite del reductor a medida que avanza un ensayo o se van realizando varios ensayos, el par resistente que tiene que superar el motor para mantener la velocidad programada va disminuyendo. Esta es la razón de que el efecto de la temperatura se pueda percibir en los pares registrado y no en las velocidades.

## 5.5 Ensayos con el freno activo

Confirmada la cuestión de la influencia del aumento de la temperatura en los ensayos, se pasa ahora a comprobar si existe diferencia entre realizar los ensayos con el motor activo o inactivo. Para ello se realiza la segunda serie de ensayos siguiendo la misma curva de velocidades programada para el motor que en la serie anterior, pero en este caso los ensayos se realizan con el motor activo.

Dado que los datos del motor y del freno son iguales debido a la junta que une los dos medidores de par, se va a representar únicamente las comparativas en velocidad y en pares del motor de las dos series de ensayos. Los resultados en velocidad se pueden ver en la figura 5-6 mientras que los registros de los pares se pueden ver en la figura 5-7.

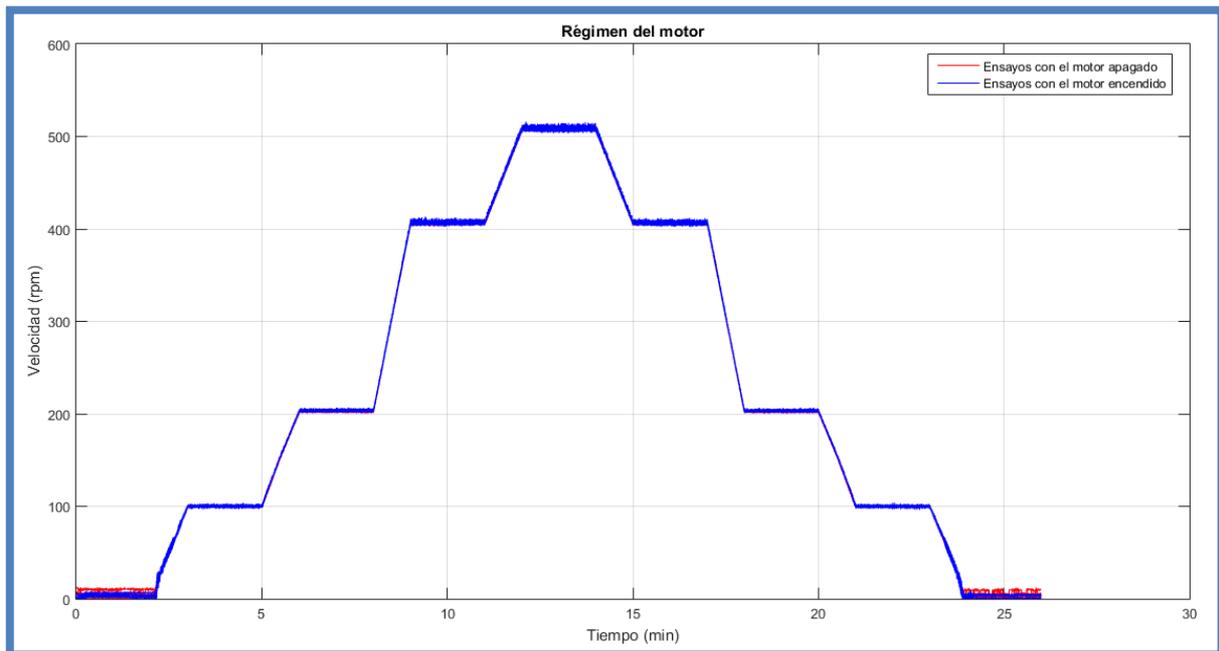


Figura 5-6. Comparativa de velocidades del motor con el motor inactivo y activo.

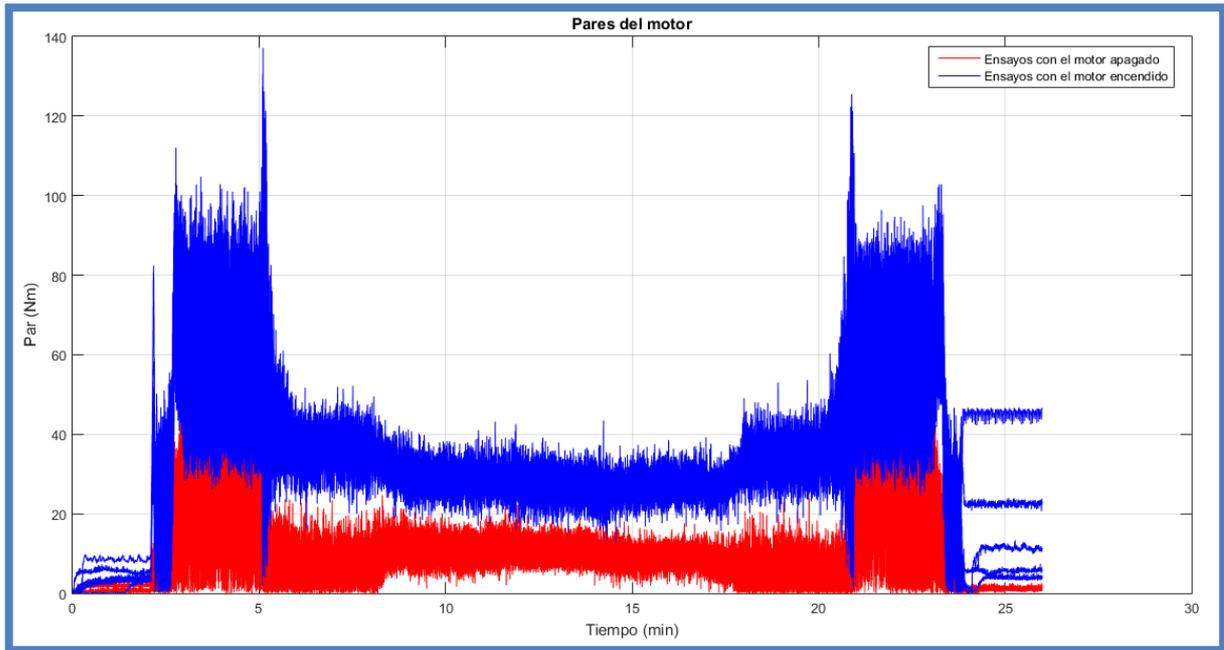


Figura 5-7. Comparativa de momentos del motor con el motor inactivo y activo.

## 5.6 Conclusiones de los ensayos con el freno activo

Igual que en la serie de ensayos anterior, no se aprecia ninguna diferencia si se analiza la comparativa en términos de velocidad, pero la diferencia se hace mucho más visible en el caso del par. La explicación de este hecho es idéntica a la que se ha realizado en la serie de ensayos anterior. En este caso el par resistente que define la diferencia entre las dos series de ensayos es el producido por el campo magnético en el interior del freno una vez está este activo.

Por todo esto se puede concluir que las hipótesis que se han realizado para el banco de ensayos son válidas con independencia del elemento ensayado, pero la forma en las que se perciben sus efectos sí que depende del elemento que se esté ensayando. Por tanto, es necesario conocer sus características para analizar correctamente los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

---

- [1] Pérez Guerrero, Francisco de Borja. Diseño, construcción y ensayo de un convertidor de par para un sistema de transmisión CVT inercial, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla (2010).
- [2] Centeno Báez, Gabriel. Desarrollo de un sistema de transmisión inercial continuamente variable para automoción, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla (2010).
- [3] Martínez Brugarolas, Álvaro Antonio. Modelización de una caja de cambios CVT y comparativa con resultados experimentales, Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla (2017)

# ANEXOS

## A. Segundo montaje. Instalación de la caja de cambios

El montaje de la caja de cambios en el banco de ensayos es uno de los puntos más críticos, ya que hubo que desplazar la mayoría de los elementos del banco para adaptarlos a dicha caja de cambios y supuso un trabajo de alineación de todos los elementos bastante complejo.

Lo primero que hubo que desplazar es el banco de ensayos completo con todos sus elementos para poder desplazar posteriormente el motor. De no haber realizado este primer paso, al desplazar el motor, el cable que une el armario de control con el motor no tendría longitud suficiente y no se podría conectar el motor.

Para desplazar el banco se fijan correctamente los puntos de anclaje de color naranja en cuatro puntos del chasis lo más próximos a los elementos colocados sobre el mismo como se muestra en la figura 3-6. Una vez hecho esto, se pasan por ellos unos ganchos metálicos y por estos ganchos se pasan 4 eslingas que se unen al gancho del puente grúa. Por último, se cierran los ganchos metálicos con unos pasadores que están roscados en el extremo.

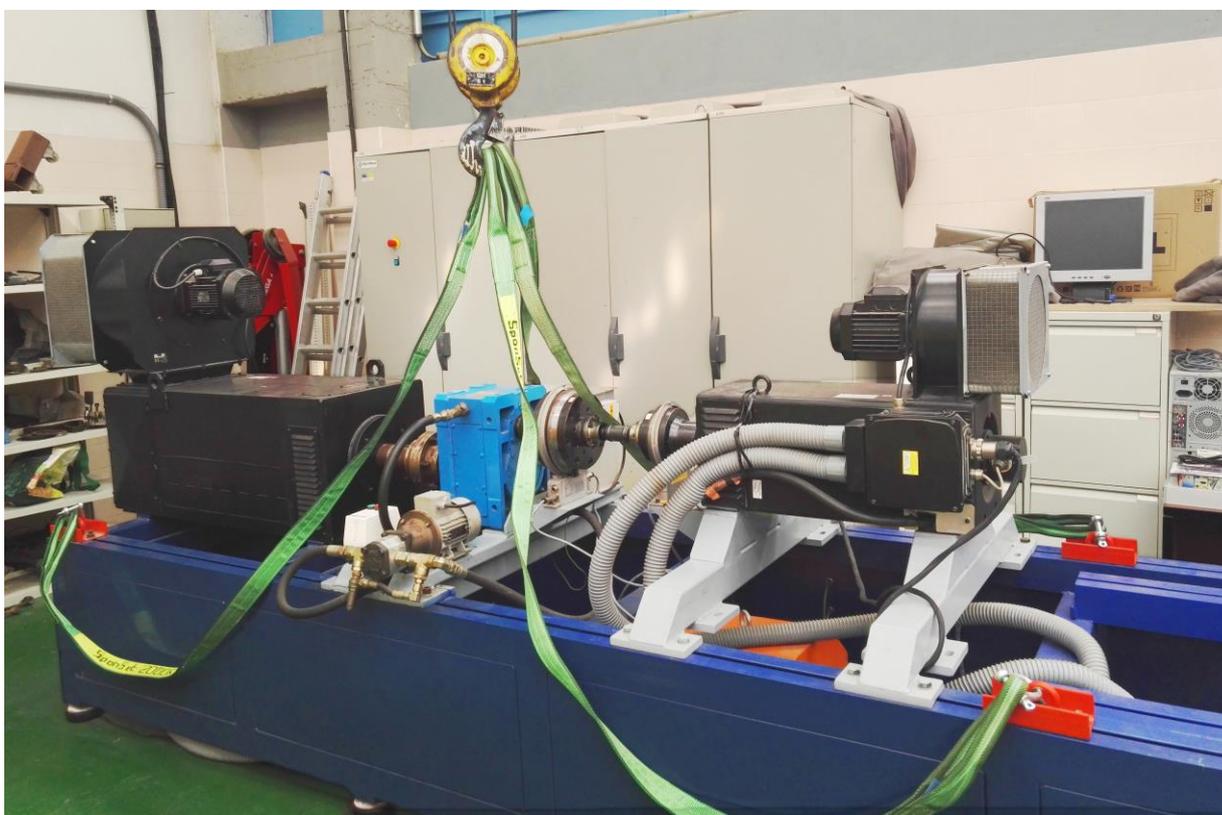


Figura A-1. Situación de los puntos de anclajes, eslingas y ganchos.

Lo que se busca es pegar todo lo posible el banco de ensayos a la estantería que se encuentra detrás del freno. Esta operación resulta bastante dificultosa por varios motivos. El primero es que se está subiendo un peso muy elevado, por lo que hay que cerciorarse de que se cumplen todas las pautas de seguridad antes de realizar cada pequeño movimiento.

El segundo es que hay una gran cantidad de cableado que suponen otro punto de atención durante las maniobras para que ninguno se corte o resulte dañado. Para intentar facilitar esta tarea se retiran los cables de menor dimensión como los cables que transmiten la información desde los medidores de par hasta la tarjeta de adquisición de datos. A pesar de esto, no se pueden retirar los cables que van al motor y al freno, de modo que hay que ir acomodándolos en todo momento para que no resulten dañados.

El último punto de gran dificultad es que, a pesar de intentar colocar los puntos de anclaje en el chasis lo más equiparados posibles en cuanto al peso que tienen que soportar cada uno, la realidad es que no se pudo evitar que los más cercanos al motor soportaran más peso. Esto hizo que, al elevar el banco de ensayos, este no lo hiciera de una forma nivelada si no con una inclinación bastante importante como se puede ver en la figura A-2.

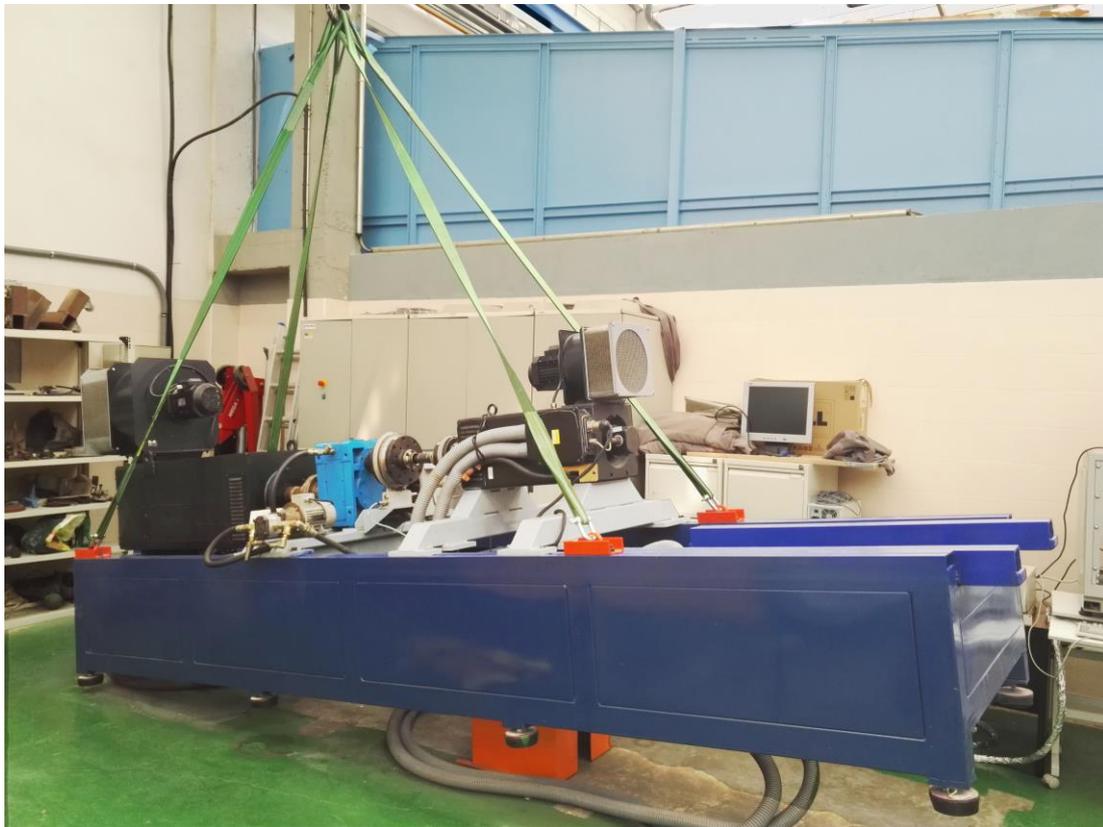


Figura A-2. Banco de ensayos inclinado durante el movimiento a su nueva posición.

Teniendo todos estos puntos en cuenta, se procede a realizar el desplazamiento. Para comenzar se eleva el banco hasta que despegue completamente del suelo. Se eleva lo mínimo posible para desplazar el banco hasta la posición que se buscaba. Posteriormente se baja casi completamente el banco, ya que se percibe que el suelo del laboratorio no es totalmente plano, de forma que se ajustan las patas regulables del chasis hasta que todas quedan correctamente apoyadas en el suelo. Una vez hecho esto se baja totalmente el banco de ensayos.

El siguiente paso es retirar lo máximo posible el motor junto al medidor de par de éste para tener espacio para colocar posteriormente la caja de cambios. Además, la entrada y la salida de la caja de cambios no se encuentran en la misma línea como sí ocurría en el caso de la junta cardán. Por ello hay que desplazar también lateralmente el motor con respecto al freno.

Para ello se retiran los tornillos y arandelas de la junta que unía el medidor de par del motor y el del freno, y se retira completamente la junta. Posteriormente se quitan los tornillos, tuercas y placas que mantenían unidos al motor y al chasis. Una vez hecho esto se usan unas eslingas con ganchos en sus extremos que se unen a los puntos de anclaje que incluye el motor y al puente grúa para mover el motor junto al medidor de par y a las vigas bajo este al extremo del banco de ensayos. De nuevo, durante el movimiento del motor hay que ser cuidadoso con los cables que van a éste para que no resulten dañados.

A continuación, se pasa a colocar la caja de cambios sobre el banco. Se comienza colocando unas vigas transversales que servirán para unir la caja de cambios al chasis del banco, ya que ésta no posee el suficiente ancho ni los puntos de unión adecuados para poder unirse directamente al chasis del banco de ensayos. Una vez colocadas las vigas se pasan los tornillos, tuercas y placas que unen dichas vigas al chasis, pero no se aprietan. Con esto se consigue que las vigas se puedan desplazar posteriormente para adaptarse a la caja de cambios, pero de forma que estas ya tengan una posición adecuada con respecto al chasis.

Tras haber hecho esto, se pasa a colocar la caja de cambios propiamente dicha encima de las vigas. La caja de cambios no dispone de elementos de anclaje para anclarlos al puente grúa como en el caso del motor ni es suficientemente ligero para moverlo a mano como en el caso de las vigas. De modo que se colocan dos eslingas en puntos donde no se produzca ningún daño en los elementos de la caja de cambios y ambas eslingas servirán de improvisados puntos de anclajes. Por estos puntos se vuelven a pasar unas eslingas que permitirán llegar hasta el gancho del puente grúa.

Hay que ser cuidadoso en la maniobra con el puente grúa ya que la caja estaba almacenada en un punto cercano a una pared y con cables del taller cerca, y el vaivén propio de un elemento suspendido a esa altura podría causar daños no solo a la caja de cambios si no también al propio laboratorio. Además, al no tener los puntos de anclaje propios y usar las eslingas para este fin, hacen que el peso no esté completamente equilibrado y haya cierto desnivel y tendencia a rotar.

Una vez superados todos estos obstáculos se coloca la caja de cambios sobre las vigas, pero aún no se desengancha del puente grúa, ya que se aprovecha para desplazar las vigas hasta hacerlas coincidir con los puntos de unión con la caja de cambios. Esta unión se realiza de nuevo con tornillos, tuercas y placas, pero no se realiza un apriete importante para permitir el movimiento de ajuste de la caja de cambios.

Como hay suficiente espacio, se pasa a colocar unas juntas que servirán de unión entre el eje de entrada y la brida del medidor de par del motor y entre el eje de salida y el medidor de par del freno. Estas juntas absorberán pequeñas desalineaciones y desajustes además de ejercer sus funciones de unión, pero se deben evitar en la medida de lo posible para que no sufran unos esfuerzos excesivos que acorten su vida útil.

Primero se colocan las juntas en los extremos de los ejes de la caja de cambios. Luego se desplazan con ayuda del puente grúa la caja de cambios y las vigas para acercarlos hasta la brida del medidor de par de freno. Una vez hecho esto, se pasa a unir finalmente la junta del eje de salida de la caja de cambios con la brida.

Como se puede deducir de todo el proceso descrito hasta ahora, los elementos del banco que no se han movido son el freno, el reductor y el medidor de par del freno, de forma que se parte de estos elementos para alinear el resto de los componentes del banco de ensayos. En este punto se realiza una primera alineación de las vigas y la caja de cambios, pero no se realiza el apriete final por si hay que realizar algún último ajuste tras colocar el motor en su posición final.

Para ir concluyendo este apartado, se cambian las eslingas de la caja de cambios por las eslingas con ganchos para mover el motor en el puente grúa. Se acerca el motor a una distancia adecuada para unir la junta del eje de entrada de la caja de cambios con la brida del medidor de par del motor. El motor cuenta en su base con una estructura con dos puntos de unión a cada lado del motor según haya que colocarlo en línea con el freno o paralelo a éste. El caso del montaje que se requiere es el último de estos dos, de forma que se cambian los tornillos, tuercas y placas de sus posiciones anteriores a las adecuadas a este montaje y se fija el motor al chasis.

Para finalizar se hace la última alineación de la caja de cambios y de las vigas sobre las que está colocada. El resultado de esta operación se muestra en las figuras A-3 y A-4. Como estos últimos ajustes son pequeños no se vuelve a usar el puente grúa, en su lugar se dan pequeños golpes con un martillo de goma hasta conseguir la posición deseada en todos los elementos. En este punto ya se realiza el apriete final de todos los componentes del banco que están sujetos al chasis y se vuelven a colocar los cables que van a los medidores de par.



Figura A-3. Comprobando la alineación de la caja de cambios.

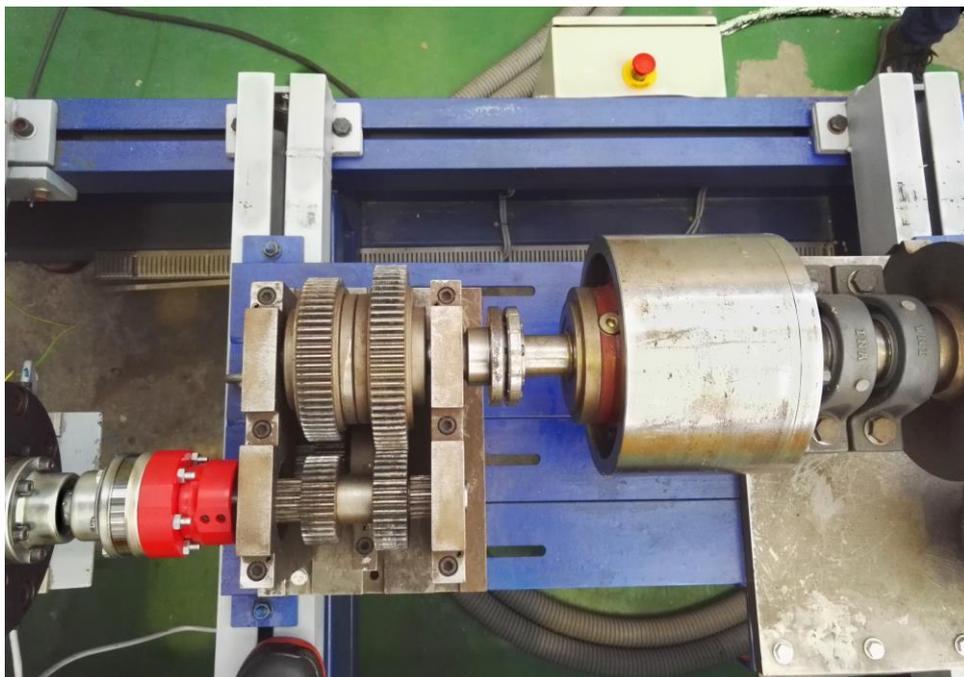


Figura A-4. Comprobando la alineación de la caja de cambios a su salida y las vigas bajo ésta.

Esta caja de cambios no está diseñada para soportar pares ni velocidades demasiado elevadas, por lo que es casi obligatorio instalar una jaula de seguridad por si algún elemento sufre una rotura. Sin embargo, no se dispone de una jaula preparada para las dimensiones de esta caja de cambios en el taller, por lo que se utiliza una que se puede ajustar y se le realizan una serie de ajustes para adaptarla.

Uno de ellos es la distancia entre los puntos de anclaje, que se tienen que ajustar a la distancia que hay entre las vigas bajo la caja de cambios. Para solucionar esto se cortan los anclajes que incluía la jaula y se sueldan en la posición adecuada a la distancia entre las vigas. Además, se precisa fabricar los elementos de fijación adecuados, para ello se sueldan unas placas con una varilla que se rosca para poder acompañarse de unas tuercas que se tenían en el laboratorio. Los resultados de estas operaciones se pueden ver en la figura A-5.



Figura A-5. Nuevo punto de unión entre la jaula de protección y la viga bajo la caja de cambios.

El último ajuste que hubo que hacer fue aumentar el tamaño de los huecos por donde tienen que pasar las juntas que sirven de unión entre la caja de cambios y los medidores de par. Esto se hizo realizando unos cortes en los espacios ya existentes. Como resultado se obtuvo un ajuste muy bueno a las dimensiones requeridas como se puede ver en las figuras A-6 y A-7.

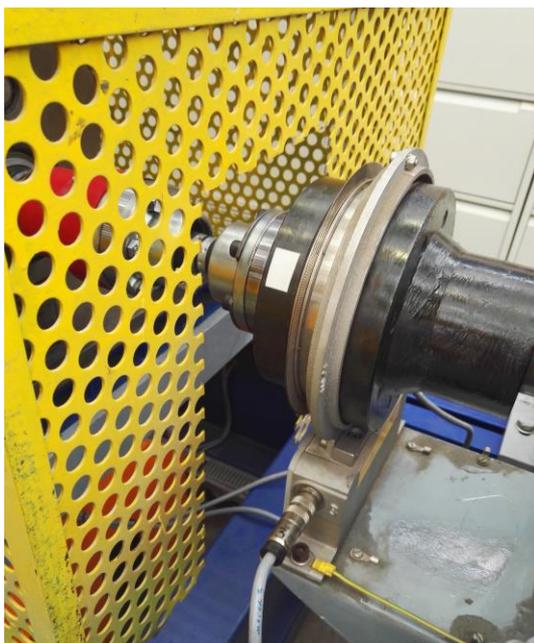


Figura A-6. Apertura realizada en la jaula para la entrada a la caja de cambios.

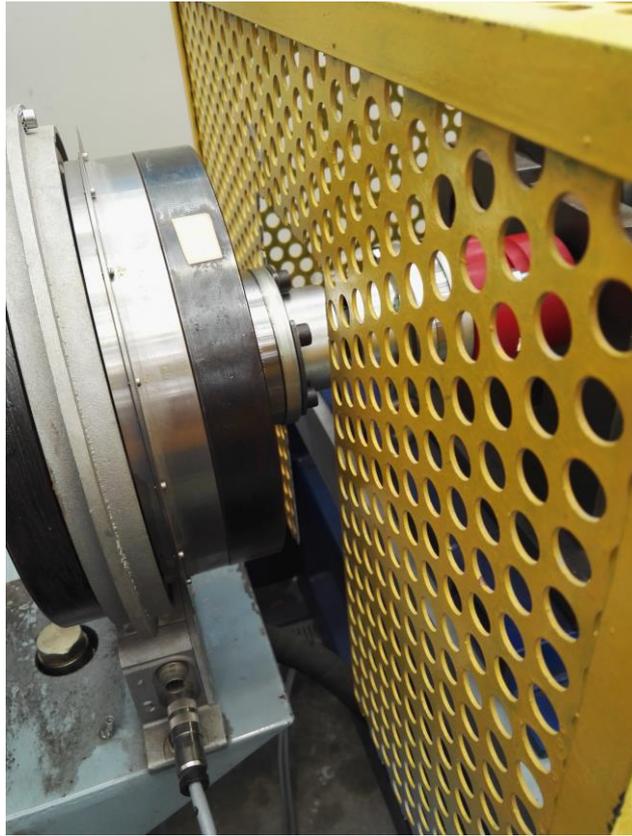


Figura A-7. Apertura realizada en la jaula para salida de la caja de cambios.

A la hora de colocar la jaula había que prestar especial atención a las juntas que se acaban de mostrar, ya que, si bien el ajuste es muy bueno, no hay mucho margen para maniobrar y podrían colisionar y causar daños a las juntas que son totalmente indeseables. Tras colocar todo correctamente, el resultado final se expone en la figura A-8.

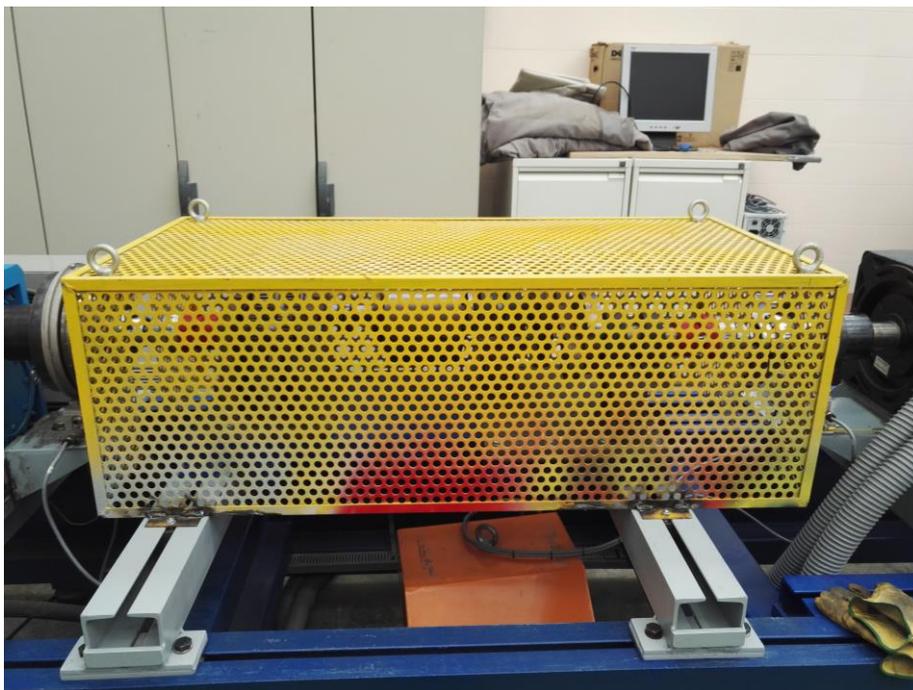


Figura A-8. Jaula de seguridad instalada.

## B. Montaje, diseño y fabricación del mecanismo que supone la modificación del rectificador

Para realizar estas modificaciones, lo primero es retirar la jaula de seguridad. Acto seguido se desconecta el eje de salida de la junta que lo une a la brida del medidor de par del freno. Una vez hecho esto se retiran los seis tornillos que unen las placas delanteras y posteriores, ya que en los huecos de éstas se encuentran los alojamientos para los rodamientos del eje de salida. Después de retirar los tornillos y las placas superiores, las cuales se muestran en la figura B-3, se retira el eje de salida de la caja de cambios que se puede ver en la figura B-2. El resultado de estas operaciones se muestra en la figura B-1.

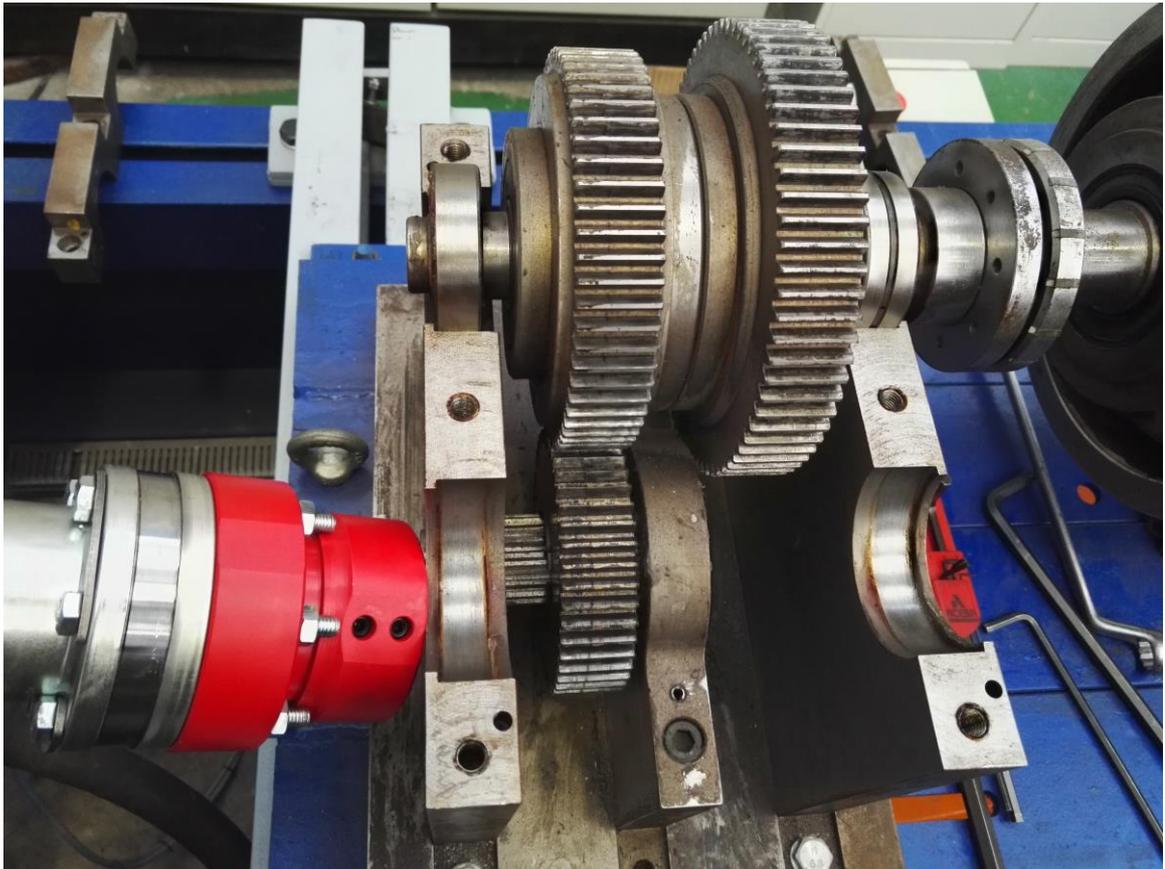


Figura B-1. Rectificador sin placas superiores y con el eje de salida retirado.

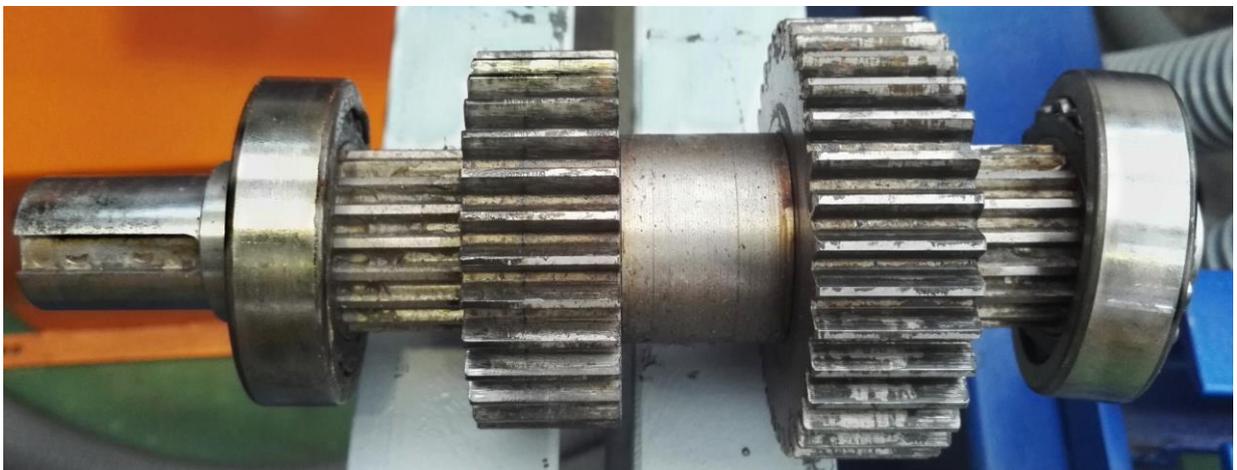


Figura B-2. Eje de salida de la caja de cambios.

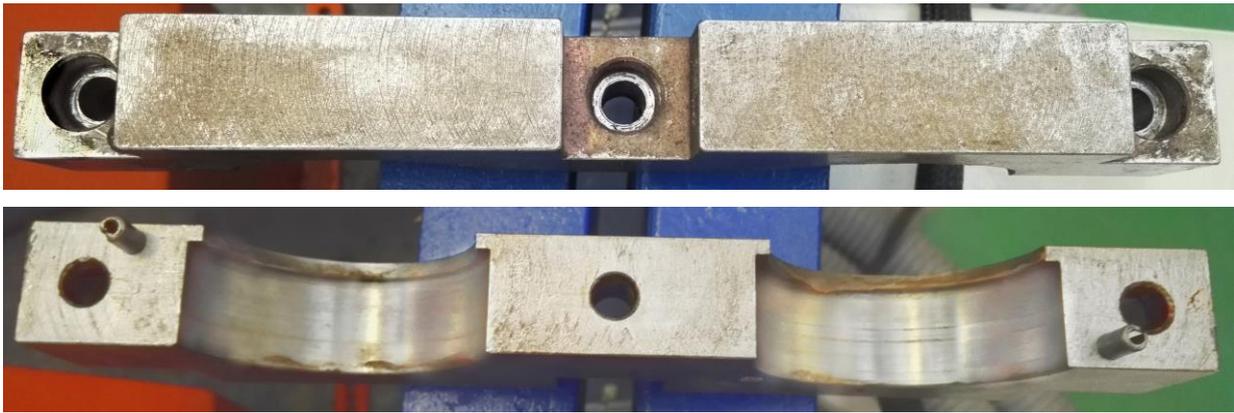


Figura B-3. Placa superiores del rectificador retiradas.

Una vez hecho esto se pasa a retirar la rueda dentada de este eje que engrana con el primer tren de engranajes. Para retirar este engranaje, primero hay que retirar el rodamiento más cercano. El problema reside en la dificultad de retirar el rodamiento, ya que no se puede realizar fuerza de cualquier forma porque se dañarían las pistas del rodamiento y éste quedaría inutilizado. Para evitar que esto ocurra se quitan los circlips de su posición en las hendiduras del eje que mantienen en su lugar al rodamiento y a la rueda dentada, y se hace uso de la herramienta que se muestra en la figura B-4 para retirar el rodamiento. Como se puede ver, se apoya en la rueda dentada para no dañar el rodamiento, ya que de esta forma se aplica la fuerza uniformemente.



Figura B-4. Herramienta para quitar el rodamiento del eje.

Tras realizar esta operación se toman medidas para fabricar un separador que encaje en el eje y permita mantener la posición del resto de elementos cuando la rueda dentada no esté montada. Mientras el técnico especialista de laboratorio realiza la fabricación de esta pieza en el torno, se aprovecha para limpiar las piezas del eje desmontado

con petróleo. Este es un elemento que aporta un doble efecto, desengrasa las piezas lo que permite limpiar la suciedad acumulada y también sirve como elemento de lubricación. En la figura B-5 se muestran las piezas tras la limpieza. También se lleva a cabo una limpieza con papeles impregnados en petróleo del resto de la caja de cambios.



Figura B-5. Piezas limpiadas con petróleo.

Una vez hecho esto se monta el separador fabricado y se vuelve a colocar el rodamiento en el eje. De nuevo, esta operación se realiza con ayuda de elementos que había en el taller que distribuyeran la fuerza empleada en el rodamiento de manera uniforme.

Finalizadas las modificaciones del eje para este montaje, se pasa a trabajar en la fijación de los engranajes del primer eje del rectificador. Para poder realizar la fijación de una de las ruedas dentadas y posteriormente la otra se decanta por la opción de instalar una placa superior, la cual tendrá cuatro agujeros en las esquinas para poder usar los mismos agujeros de fijación que ya había en el rectificador, y cuatro agujeros colocados sobre las dos ruedas dentadas en los que irán unos tornillos con un sistema de tuerca-contratuerca. De este modo se fijarán con dos tornillos la rueda que se precise mientras que los otros dos quedarán elevados sin interferir, y se podrá cambiar fácilmente entre ellos solo con el movimiento de las tuercas. Para terminar, se colocan unos tubos cortados a la altura precisa para dar la separación a la placa. Si no estuviesen la placa caería hasta tocar el rectificador. En la figura B-6 se muestran todos los elementos que se acaban de describir.

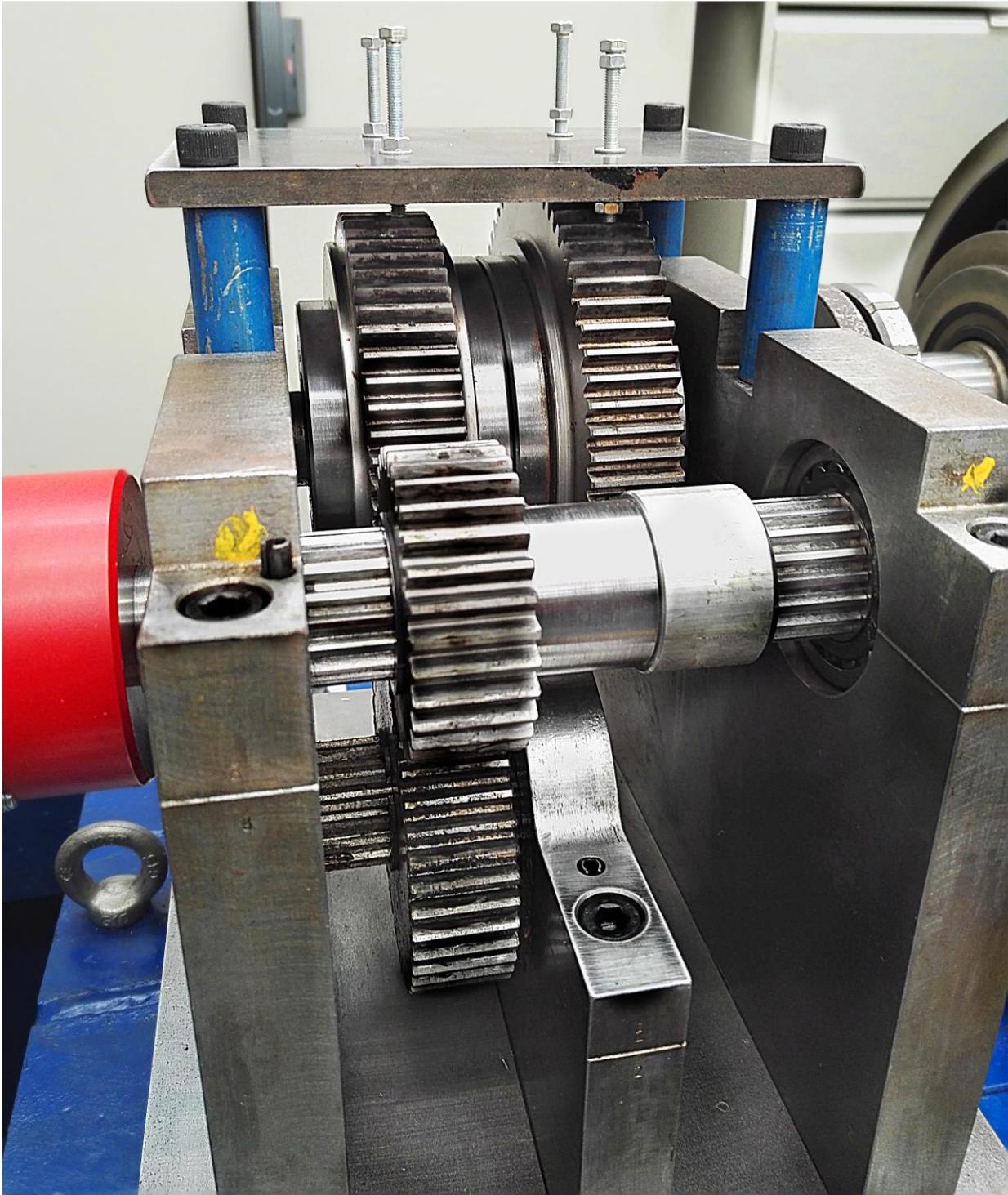


Figura B-6. Reductora con el mecanismo de bloqueo instalado.

Una vez hecho todo esto solo queda volver a colocar el eje de salida en su lugar, unirlo a la junta de salida y fijarlo todo definitivamente. El resultado se puede ver en la imagen anterior.

### C. Montaje de la nueva modificación

Se pasa al montaje en el que el primer tren de engranajes queda libre y el segundo está bloqueado. Para bloquear la rueda libre correspondiente al segundo tren de engranajes y liberar la del primer tren basta con ajustar los tornillos y las tuercas-contratuercas. Sin embargo, en el eje de salida se retiró la rueda dentada del primer tren de

engranajes sustituyéndola por un espaciador. Es necesario retirar el eje de salida de la caja de cambios, volver a colocar la rueda dentada en su lugar original y retirar la segunda rueda dentada y sustituirla por un espaciador.

Este proceso es prácticamente idéntico al que se ha descrito en el montaje anterior, con la salvedad de que en aquella ocasión se utilizó la propia rueda dentada para retirar el rodamiento del eje sin dañar el rodamiento. En este caso ya no se tiene la rueda dentada en esa posición, sino que en su lugar se encuentra el espaciador.

La mejor opción era retirar el rodamiento opuesto para usar de ayuda el rodamiento que aún quedaba en el eje y que había que retirar. La dificultad de esta operación residía en el agarre del eje, ya que anteriormente se fijó con una mordaza el extremo que se unía a la junta, por lo que había margen suficiente. Sin embargo, ahora había que realizar el agarre a la mordaza por el extremo opuesto, del que no se dispone de margen ya que el rodamiento está colocado justo en el final del eje. Esto se puede ver en la figura C-1.

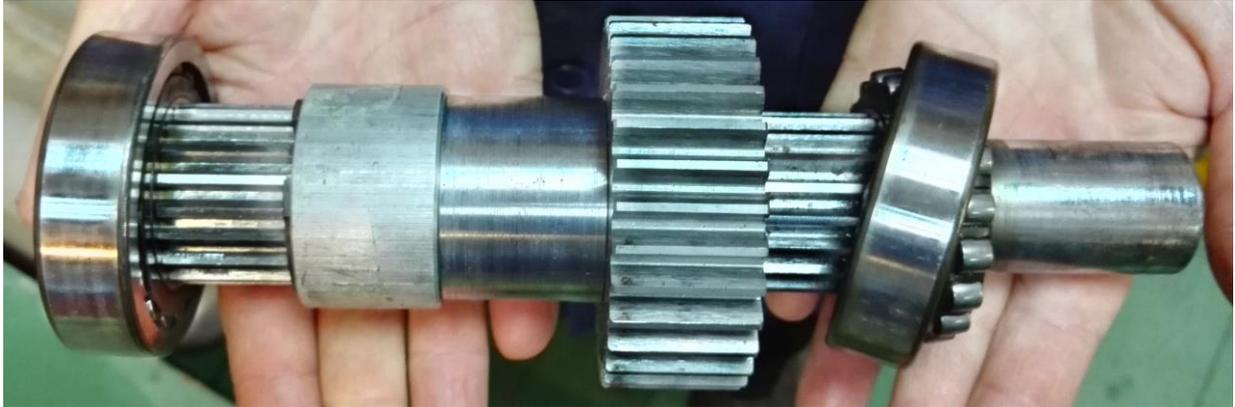


Figura C-1. Eje de salida sin la rueda dentada del primer tren de engranajes.

Para superar esta dificultad se introdujo el rodamiento del extremo del eje todo lo posible en el propio eje, ya que no se podía extraer, con ayuda de diferentes piezas del laboratorio para distribuir la fuerza y evitar dañarlo. Una vez hecho esto se fijó el eje por ese lado a la mordaza. Como se puede ver en la figura C-2 la unión con la mordaza no era totalmente rígida, pero sí lo suficiente como para poder retirar el rodamiento y retirar y colocar todos los elementos en el orden correcto. Cabe destacar que el separador que se fabricó para el anterior montaje puede volver a usarse en este, ya que el ancho de las dos ruedas dentadas es el mismo.



Figura C-2. Retirada del rodamiento opuesto a la primera configuración de bloqueo.

Una vez realizadas todas estas operaciones, se vuelve a colocar el eje de salida en la rectificadora. El resultado final se puede ver en la figura C-3.

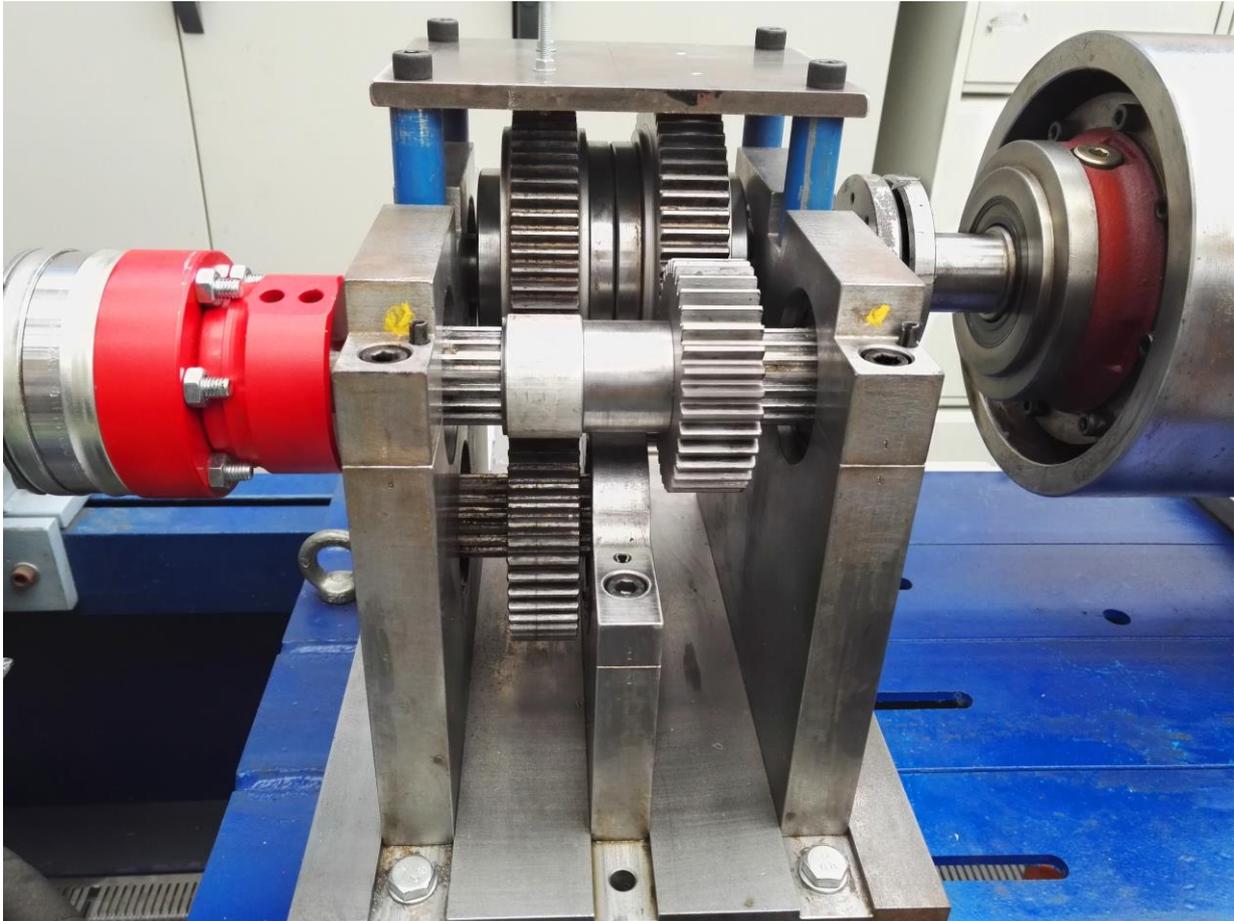


Figura C-3. Rectificadora con el segundo tren de engranajes bloqueado.

Una vez terminado el montaje se realizan los ensayos. Se vuelve a seguir el procedimiento que se ha descrito en los ensayos con la rectificadora funcionando completamente y que también se ha seguido con la primera modificación de la reductora.

## D. Reparaciones

Antes de continuar con los ensayos se reemplaza el tornillo que ha colapsado. Además, para reforzar la fijación del segundo tren de engranajes se coloca un tornillo de mayor métrica con su correspondiente tuerca-contratuerca en el punto medio de los dos tornillos ya existentes. Estas modificaciones se pueden observar en la figura D-1.

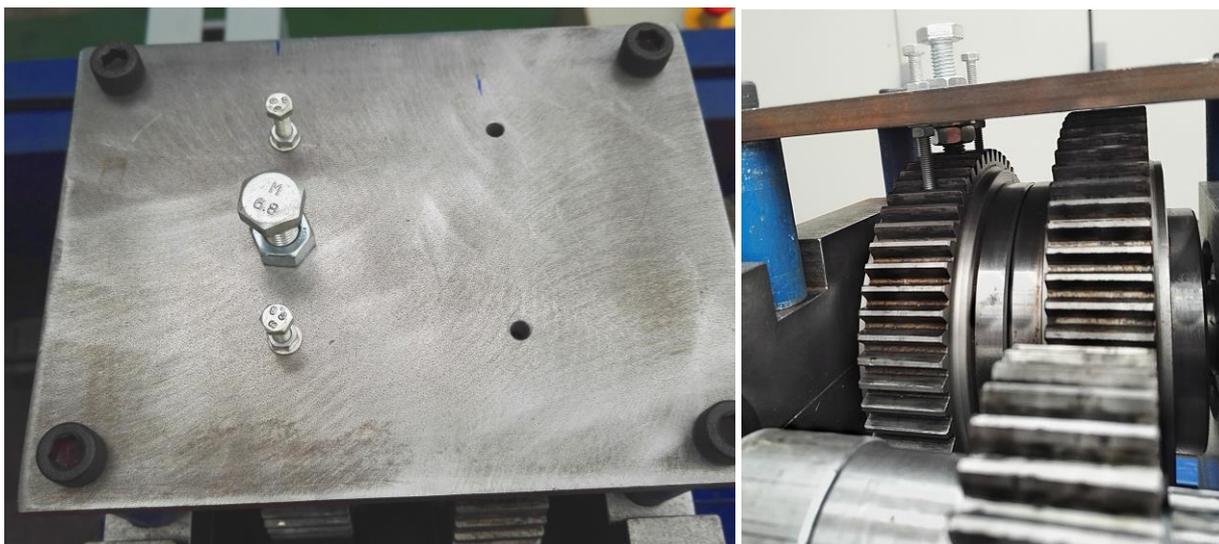


Figura D-1. Reparaciones y modificaciones del mecanismo de fijación.

## E. Montaje de la nueva configuración del banco de ensayos

El primer paso es volver al montaje del banco de ensayos anterior, es decir, retirar la caja de cambios y las vigas que la unen al banco, volver a colocar la junta y desplazar el motor a su ubicación anterior. El proceso de desmontaje es muy similar al que se siguió en el capítulo 3 efectuándolo en orden inverso, por ello no se va a repetir.

La única diferencia es que, si bien el proceso de montaje y desmontajes es muy laborioso, en este caso solo hay que alinear el motor con el freno y la junta, mientras que en la instalación de la caja de cambios hubo que realizar muchos ajustes que todos los elementos encajaran y estuvieran bien alineados.

Para finalizar esta sección sobre la vuelta a la primera configuración del banco, se va a mostrar un detalle que se descubrió una vez desmontada la caja de cambios. Si se recuerdan las primeras pruebas de la caja de cambios para comprobar que todo estuviera correcto, se detectó un ruido procedente de las vibraciones en los soportes del eje de entrada a la caja de cambios a causa de que unos tornillos no estaban adecuadamente apretados. En la figura E-1 se pueden ver los efectos que tuvo esas vibraciones sobre los pasadores y la brida de la entrada de la caja de cambios, y el eje de entrada de la caja de cambios en la figura E-2.

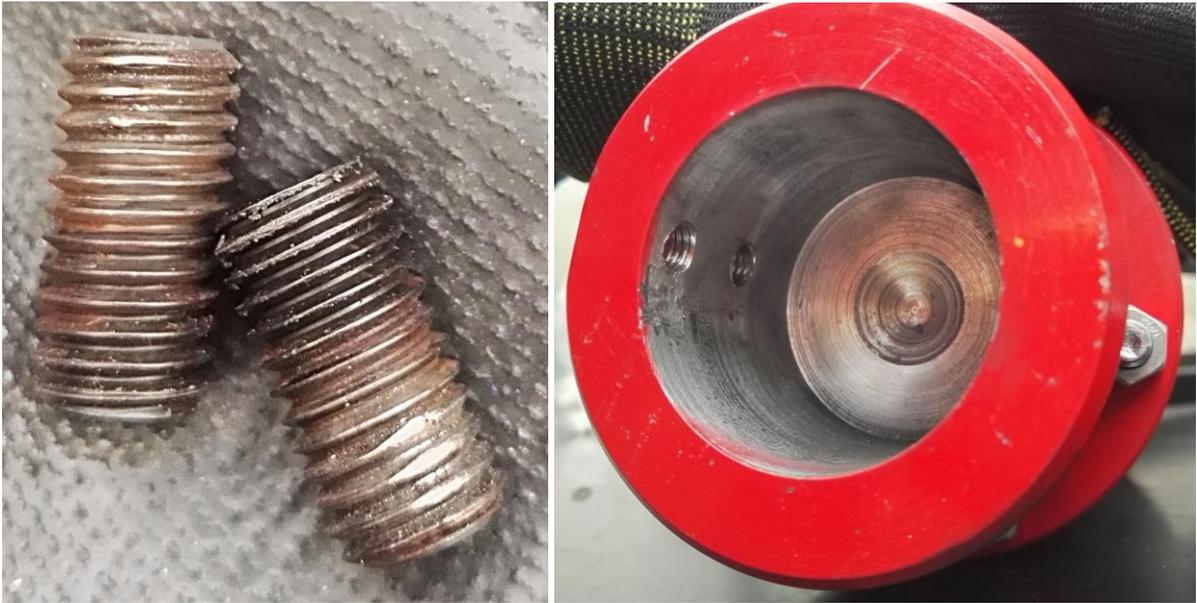


Figura E-9. Efecto de las vibraciones sobre los pasadores y la brida de entrada de la caja de cambios.

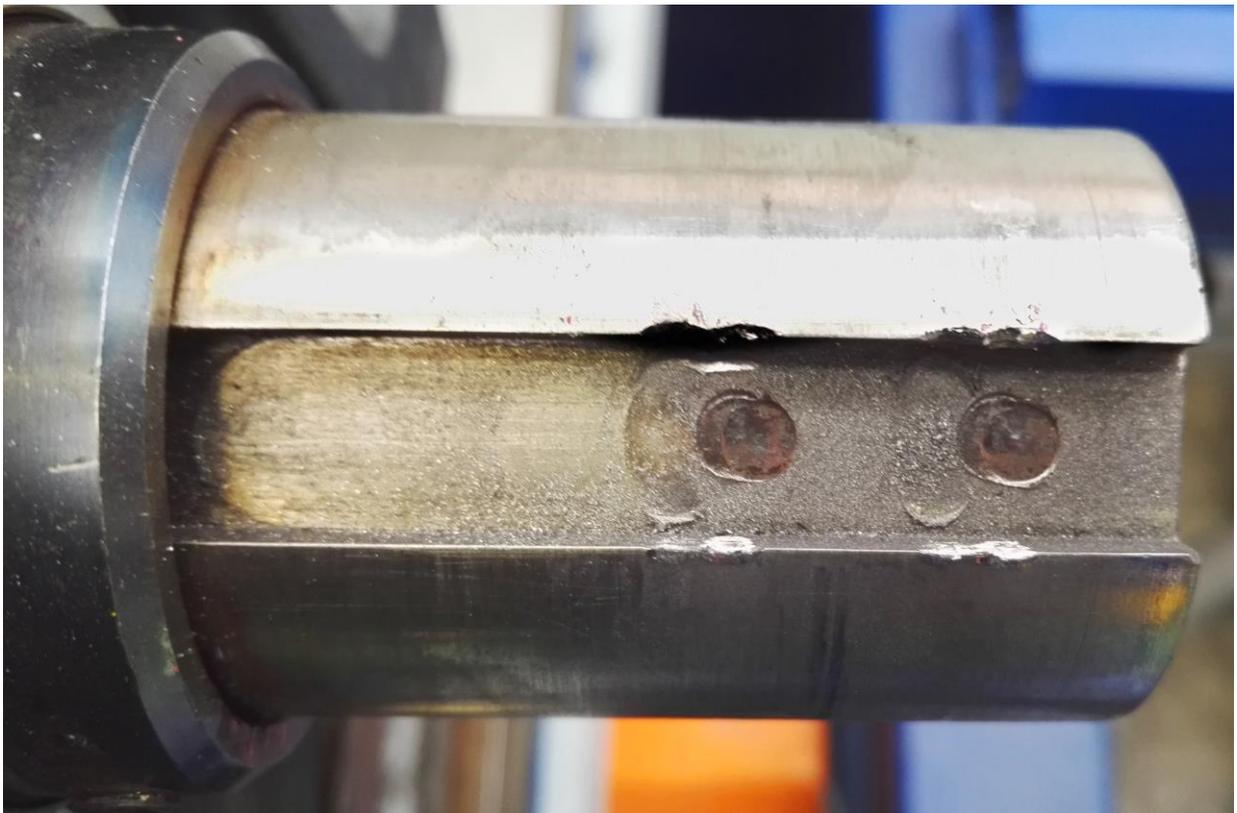


Figura E-10. Efecto de las vibraciones sobre el eje de entrada de la caja de cambios.





—