

Cúpula

Informe de pruebas de la Compuerta Superior de la
Cúpula:
Septiembre 2013-Mayo 2014

Código : RPT/EDIF/0413-R

Edición : 1.A

Fecha: 2014-05-16

Gran Telescopio de Canarias, S.A.

*Instituto de Astrofísica de Canarias
Vía Láctea s/n
38200 - LA LAGUNA, TENERIFE, Islas Canarias
Tfno +34 922 315 031 Fax +34 922 315 032*

*Centro Común de Astrofísica de La Palma
Cuesta de San José s/n
38712 BREÑA BAJA, LA PALMA, Islas Canarias
Tfno +34 922 425 720 Fax +34 922 425 701*

<http://www.gtc.iac.es> E-Mail: gtc@iac.es

Control de aprobación

Autor/es:	Lluís Cavaller Marques Ingeniero de Desarrollos
Autorizado por:	Pedro Álvarez Martín Director Fecha:2014-05-16

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	5
2. PRUEBAS REALIZADAS	5
2.1 DETERMINACIÓN DEL PAR MÁXIMO DE LOS MOTORES	5
2.2 MODIFICACIÓN DE LA TABLA DE POSICIONES DE LOS MOTORES E INCREMENTO DEL RANGO DE APERTURA	7
2.3 CIERRE DE LA COMPUERTA CON TRES MOTORES SIN AYUDA EXTERNA.....	14
2.4 CIERRE DE LA COMPUERTA CON TRES MOTORES CON AYUDA DE UNA GRÚA.....	21
2.5 CIERRE DE LA COMPUERTA CON TRES MOTORES CON ARRASTRE DE LA COMPUERTA INFERIOR	24
2.5.1 Arrastre mediante los motores de la compuerta inferior.....	26
2.5.2 Arrastre por peso propio de la compuerta inferior.....	26
2.6 PRUEBA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE MOTORES MEDIANTE SEGUIDOR COMPENSADOR DE VELOCIDAD	28
2.6.1 Rango de apertura 70º.....	28
2.6.2 Rango de apertura 86º.....	32
3. CONCLUSIONES	33
4. ANEXO: ARCHIVOS DE DATOS.....	34

1. INTRODUCCIÓN

Desde Septiembre de 2013 hasta Mayo de 2014 se realizaron pruebas en la compuerta superior con los siguientes objetivos:

- Determinar los márgenes actuales de operación de los accionamientos
- Mejorar el reparto de cargas entre los cuatro accionamientos
- Verificar la viabilidad de extender el rango de apertura actual
- Comprobar la viabilidad del cierre de la compuerta con tres motores en el caso de fallo de uno de ellos

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

1. Determinación del par máximo de los motores
2. Modificación de la tabla de posiciones de los motores e incremento del rango de apertura
3. Cierre de la compuerta con tres motores sin ayuda externa
4. Cierre de la compuerta con tres motores con ayuda de una grúa
5. Cierre de la compuerta con tres motores con arrastre de la compuerta inferior
6. Prueba de la estrategia de control de motores mediante seguidor compensador de velocidad

2. PRUEBAS REALIZADAS

2.1 DETERMINACIÓN DEL PAR MÁXIMO DE LOS MOTORES

Para comprobar el margen de par existente en los motores y la capacidad de cierre de la compuerta con tres motores se comprobó el par máximo que pueden proporcionar los motores antes de parar por sobrecarga (par de arranque de los motores) y la fuerza resultante en las cadenas. Para ello se mantuvo tres de los motores frenados y se intentó mover la compuerta con un solo motor hasta que el motor parara por sobrecarga. El proceso se realizó con cada uno de los cuatro motores. Las pruebas se realizaron con la compuerta situada a una apertura aprox. de 40º, tratando de realizar un movimiento de cierre. El control de los motores se realizaba a velocidad constante de 520rpm mediante la botonera manual.

En la siguiente figura se observa que todos los motores pueden proporcionar un par máximo de 500Nm con un consumo de 77A antes de pararse por sobrecarga, produciendo una carga en las cadenas de aprox. 35Ton. El comportamiento observado es similar en los 4 motores. Los valores obtenidos son similares a los esperados, aunque el par motor máximo registrado es aprox. un 15% inferior al par máximo teórico de los motores (586Nm a 77A).

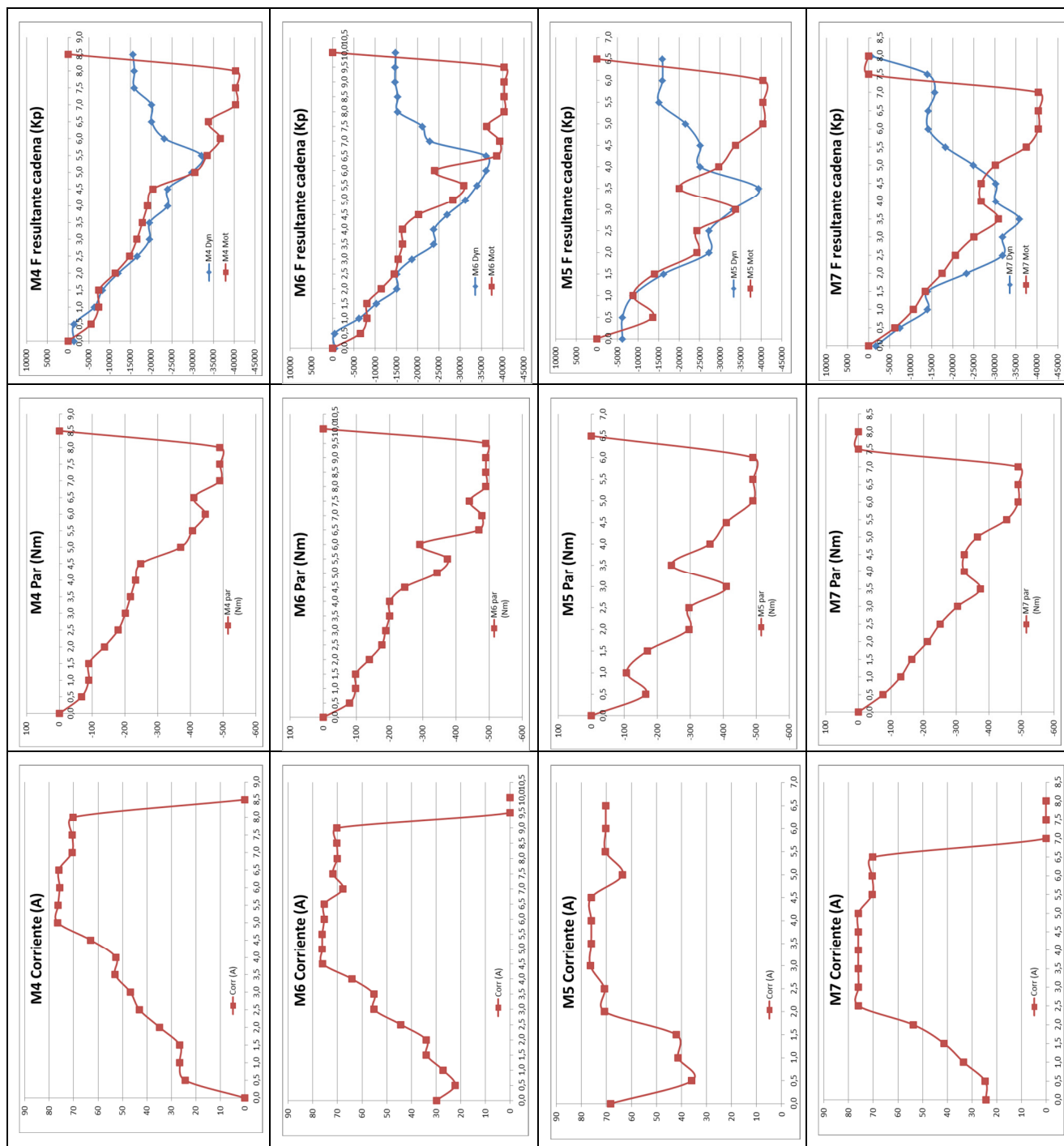


Fig 2.1 Fuerza máxima en las cadenas, par motor y corriente del motor registrados en las pruebas de par máximo de los motores.

Para realizar el cierre con tres motores, evitando el desvío de la compuerta en las deficientes condiciones actuales del sistema de guiado, el motor del lado que trabaja solo debe proporcionar la misma fuerza que los dos motores del lado opuesto además de la carga resistente del reductor arrastrado (aprox. 3Ton). Para facilitar el cierre, existe la posibilidad de arrastrar la compuerta grande mediante la compuerta pequeña, que mediante los enganches que se han implementado puede proporcionar una capacidad de arrastre de 10Ton (5Ton a cada lado).

En la siguiente tabla se presenta el par motor esperado y la carga que se produciría en las cadenas más cargadas de la compuerta superior al cerrarla con tres motores desde las posiciones de 70° y 80°, asumiendo que la compuerta se cierra sin arrastre de la compuerta inferior o incluyendo el arrastre de la compuerta inferior. Se presenta el caso peor

en el cual el accionamiento de un lado debe proporcionar el mismo arrastre al de los dos accionamientos del lado opuesto.

	Sin Arrastre de la Comp. Inferior		Con arrastre de la Comp. Inferior (5 Ton, lado arrastrado)	
Apertura de partida	70º	80º	70º	80º
Par mot Max (Nm)	330	363	275	308
F cad Max (Ton)	30	33	25	28

Tabla 2.1 Par motor máximo esperado y fuerza máxima en las cadenas esperada al iniciarse el cierre de la compuerta superior con tres motores.

De los resultados obtenidos se demuestra que los motores pueden proporcionar picos de par superiores al par necesario estimado en el peor caso para cerrar la compuerta superior con tres motores partiendo de una posición de apertura de 80º sin utilizarse medios de arrastre auxiliares. El sistema incluso debería ser capaz de cerrar la compuerta superior con únicamente dos motores, si correspondieran a lados opuestos.

2.2 MODIFICACIÓN DE LA TABLA DE POSICIONES DE LOS MOTORES E INCREMENTO DEL RANGO DE APERTURA

Hasta septiembre de 2013, la apertura y cierre de la compuerta superior estaba gobernada mediante una tabla de posiciones de los motores en la cual se definían 23 posiciones de corrección en todo el rango de apertura de la compuerta, disponiéndose las posiciones de corrección cada 3.5º aprox. La tabla que se venía usando definía la misma posición para los cuatro motores de la compuerta. La diferente longitud de los tramos de cadena sometidos a tensión en las diferentes posiciones de la compuerta producía que unas cadenas se cargasen más que las otras y por tanto unos motores soportaran mayor carga que los otros. Esto era especialmente crítico en los instantes iniciales del cierre, en los cuales se observaba un incremento de carga en los motores y cadenas de los accionamientos inferiores (M5, M7) frente a los superiores (M4, M6).

En campañas de pruebas realizadas en el pasado se probó a variar los valores de la tabla de posiciones de los motores superiores en los instantes iniciales del cierre, con el fin de aumentar la carga de los mismos para equilibrar la carga de los motores inferiores. En esas pruebas se introdujo un desfase variando desde 0.1º a 70º hasta 0.18º a 76º. Hasta ese momento, debido a que la compuerta se estaba abriendo únicamente 70º, estos desfases no se estaban aplicando.

Con objeto de igualar el reparto de cargas entre los cuatro accionamientos en los instantes iniciales del cierre, el 27/09 se realizaron pruebas variando la tabla de posiciones que gobierna la apertura y cierre de los motores. En la nueva tabla se definieron posiciones de control cada 2º. Inicialmente se definieron las posiciones nominales iguales para los cuatro accionamientos, introduciéndose posteriormente un retraso en los motores superiores (M4, M6) variando linealmente desde 0º en la posición 50º hasta 0.1º en la posición 70º. Se realizaron pruebas con diferentes valores de retraso, obteniéndose el mejor comportamiento en el reparto de cargas con los valores mencionados. Los mismos retrasos en los motores superiores se introdujeron tanto en el ciclo de apertura como en el ciclo de cierre de la compuerta.

En las siguientes figuras se presenta la carga en las cadenas (punto fijo y extremo de las reductoras) y el par motor obtenidos en los ciclos probados antes y después de actualizar la tabla de posiciones. En la primera columna de gráficas se observa el comportamiento global en todo el ciclo de apertura y cierre, mientras que en la segunda serie de gráficos se detalla el comportamiento en la zona de máxima apertura, al iniciarse el ciclo de cierre, zona en la cual se registran las mayores cargas.

Los resultados muestran un reparto más equilibrado de cargas de los cuatro accionamientos con la nueva tabla de posiciones, acercándose los valores de carga máxima de las cadenas y de par motor al valor promedio de carga, especialmente en la zona de máxima carga al inicio de la maniobra de cierre.

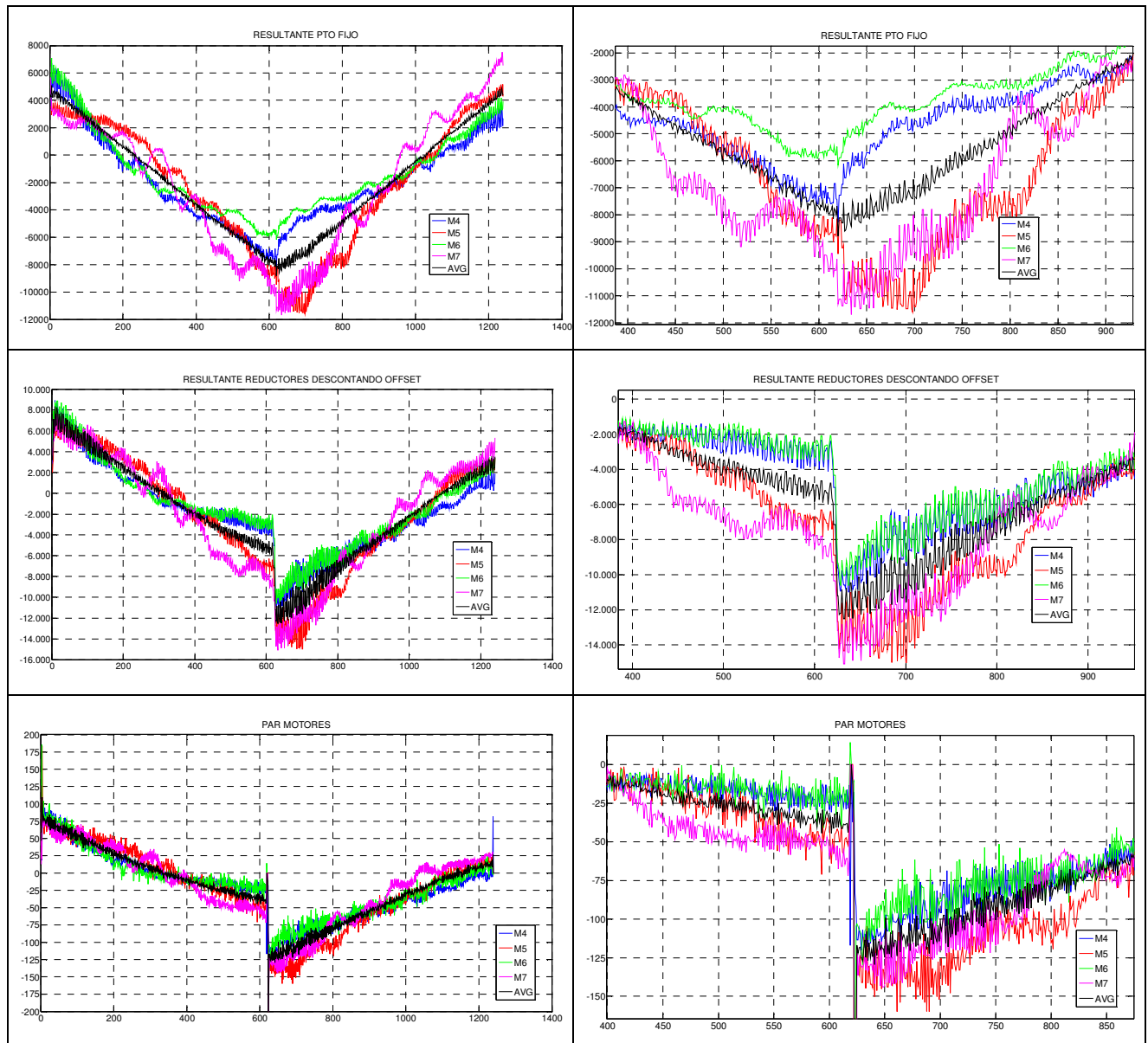


Fig. 2.2 Apertura-Cierre 70º tabla antigua (antes de 27/09/13). Ejes abscisas: Tiempo (s); Ejes ordenadas: Fuerza (Kp) o Momento (Nm)

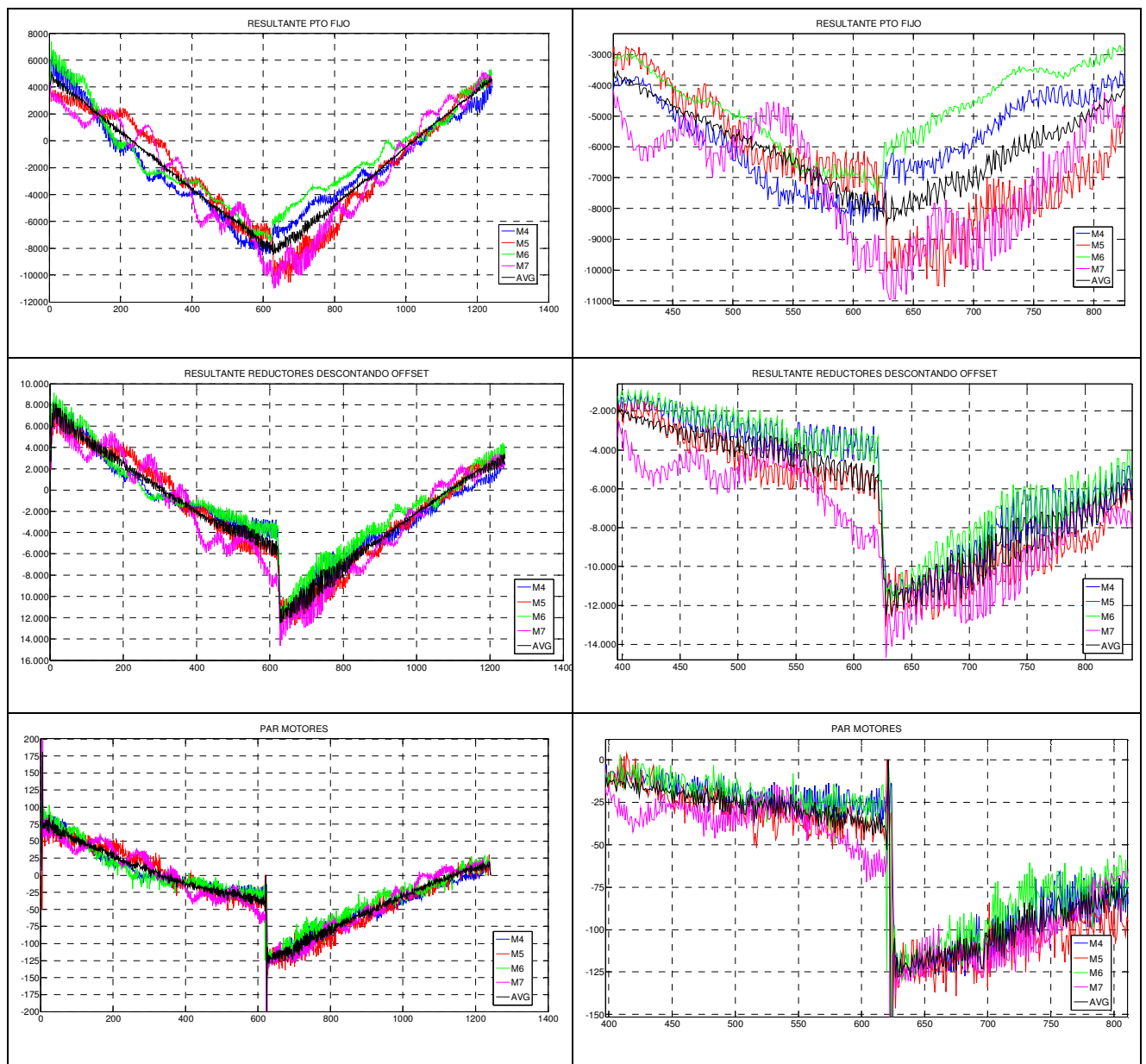


Fig. 2.3 Apertura-Cierre 70° tabla nueva (27/09/13). Ejes abscisas: Tiempo (s); Ejes ordenadas: Fuerza (Kp) o Momento (Nm)

	Fmax promedio Cadena más cargada	Fmax pico Cadena más cargada	Fmax promedio Motor más cargado	Fmax pico Motor más cargado
Tabla Antigua	13 Ton	14 Ton	140 Nm	150 Nm
Tabla Nueva	12 Ton	13 Ton	130 Nm	140 Nm

Tabla 2.2 Valores máximos de la carga en las cadenas y de par motor obtenidos con las dos tablas de posición.

Durante los días 22-24/10 se realizaron pruebas de incremento del rango de apertura de la compuerta superior extendiendo la nueva tabla de posiciones hasta el rango de apertura total de 90°. La extensión de la tabla incluye un retraso en los motores superiores variando linealmente desde 0.1° en la posición 70° hasta 0.15° en la posición 90°, además del retraso ya incluido previamente en el rango desde 50° hasta 70°. Los mismos retrasos en los motores superiores se introdujeron tanto en el ciclo de apertura como en el ciclo de cierre de la compuerta. Utilizando esta tabla se realizaron ciclos de apertura y cierre de 80°, 85° y 90°, consiguiéndose cerrar normalmente la compuerta en todos los casos. En las siguientes figuras se presenta la carga en las cadenas (punto fijo y extremo de las reductoras) y el par motor obtenidos en los ciclos probados.

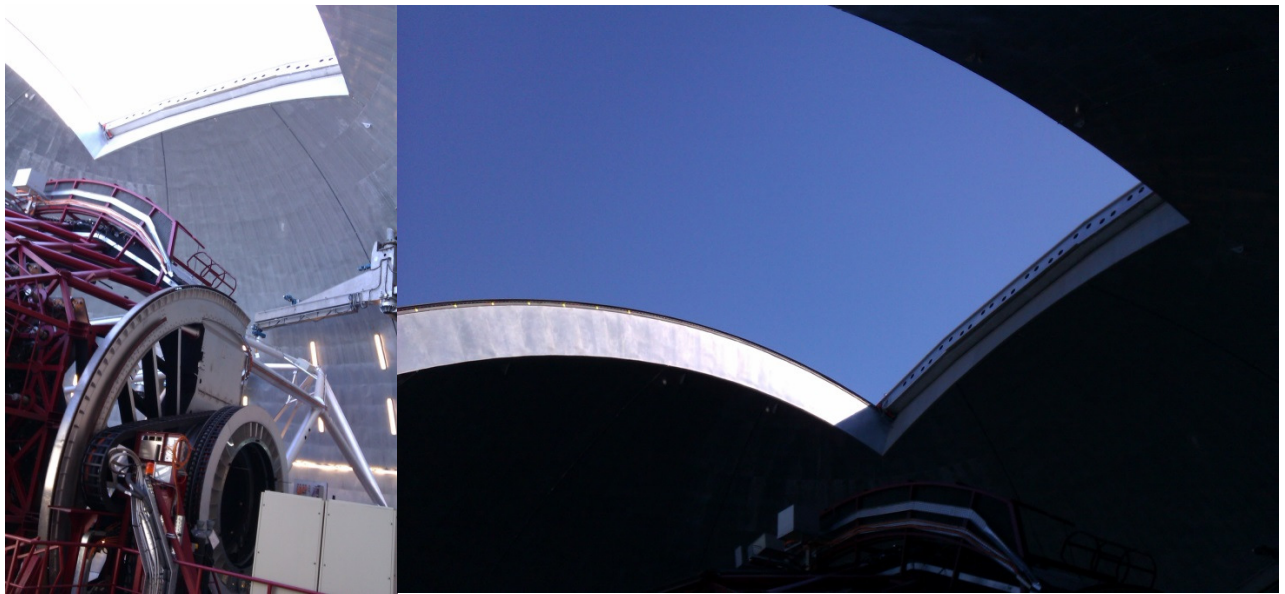


Fig 2.4 Apertura completa de la compuerta durante las pruebas.

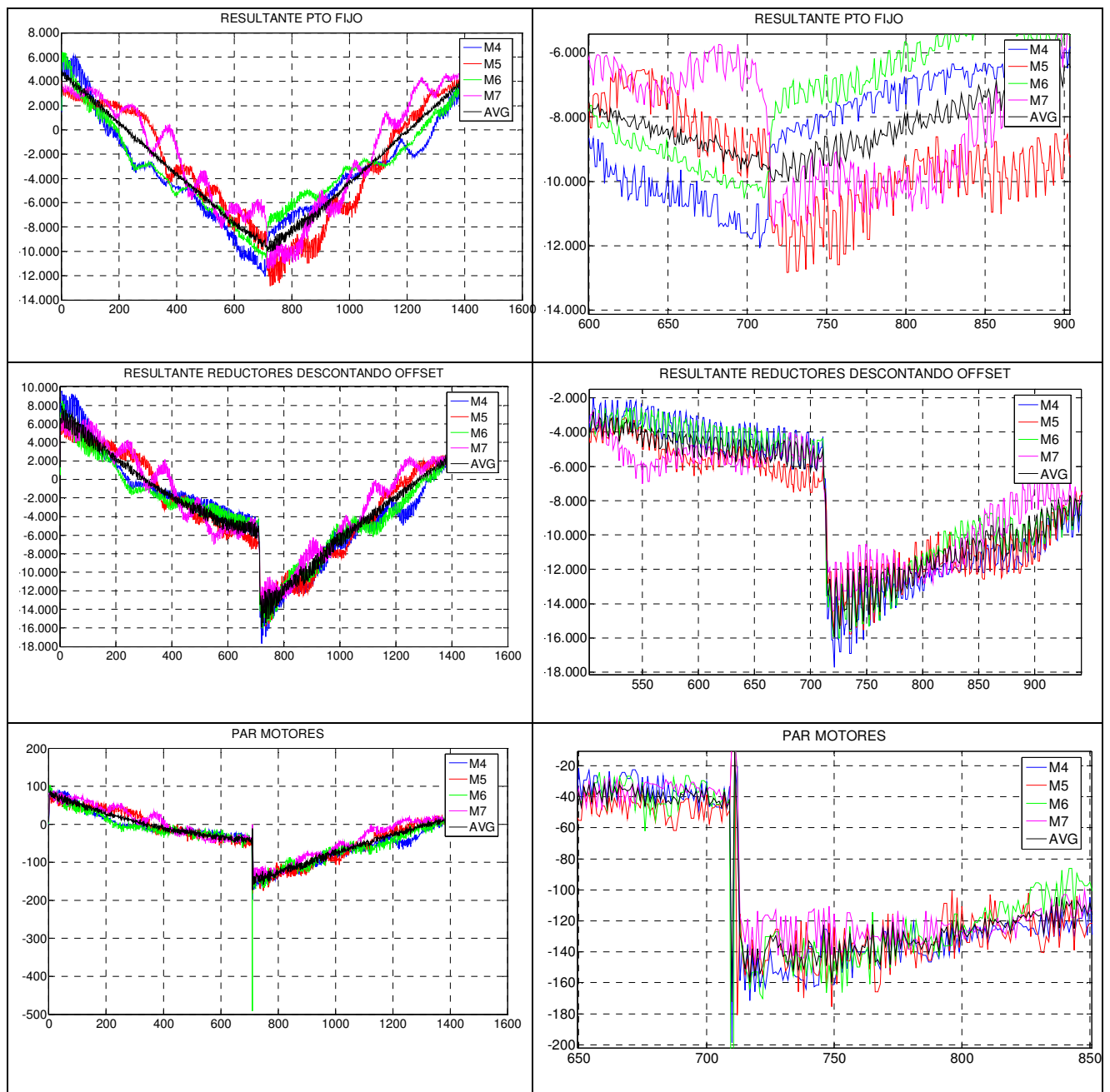


Fig. 2.4 Apertura-Cierre 80° (23/10/13). Ejes abscisas: Tiempo (s); Ejes ordenadas: Fuerza (Kp) o Momento (Nm)

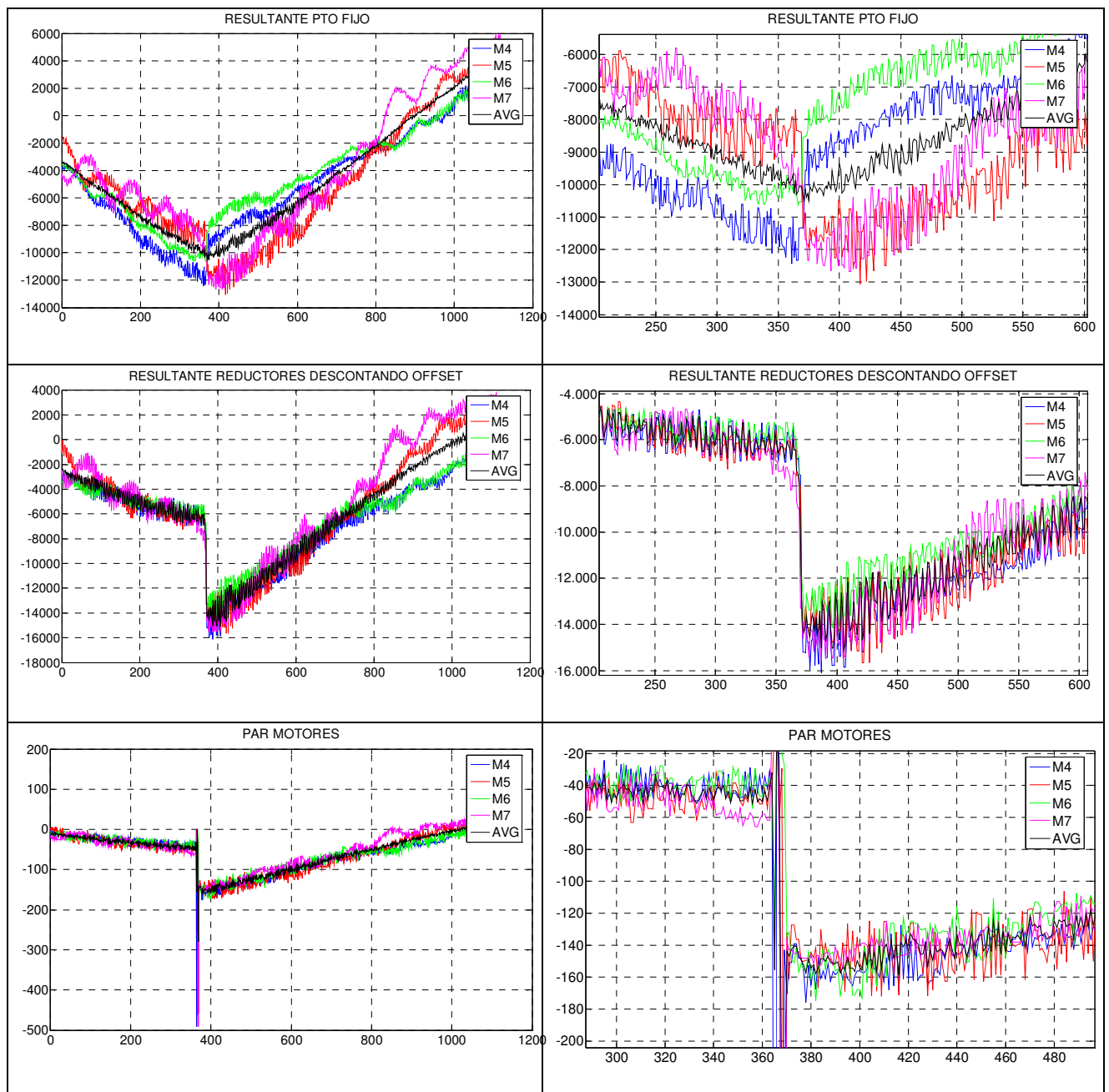


Fig. 2.5 Apertura-Cierre 85° (apertura empieza en 45°) (23/10/13). Ejes abscisas: Tiempo (s); Ejes ordenadas: Fuerza (Kp) o Momento (Nm)

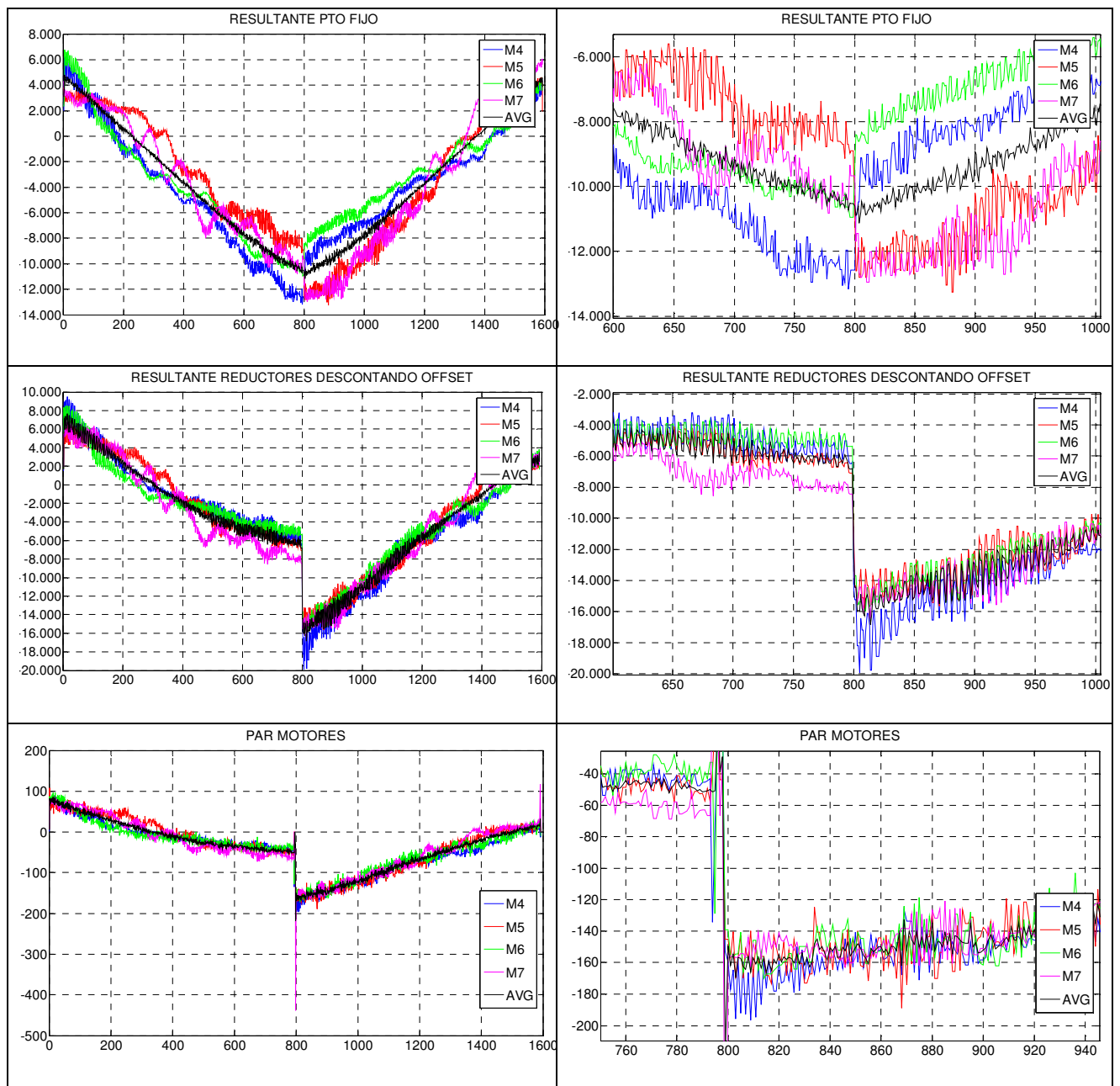


Fig. 2.6 Apertura-Cierre 90° (23/10/13). Ejes abscisas: Tiempo (s); Ejes ordenadas: Fuerza (Kp) o Momento (Nm)

	70º tabla antigua	70º tabla nueva	80º	85º	90º
Fmax promedio (Ton)	13	12	15	15	18
Cad. más cargada	(cs 4.1)	(cs 4.4)	(cs 3.5)	(cs 3.5)	(cs 2.9)
Fmax pico (Ton)	14	13	17	16	19
Cad. más cargada	(cs 3.8)	(cs 4.1)	(cs 3.1)	(cs 3.3)	(cs 2.8)
Γmax promedio (Nm)	140	130	150	160	180
Cad. más cargada	(cs 1.75)	(cs 1.88)	(cs 1.6)	(cs 1.5)	(cs 1.36)
Γmax pico (Nm)	150	140	160	170	190
Cad. más cargada	(cs 1.6)	(cs 1.75)	(cs 1.5)	(cs 1.44)	(cs 1.3)

Tabla 2.3 Cargas máximas medidas y coeficientes de seguridad obtenidos para las cadenas (Fmax=53Ton) y los motores (Γnom=245Nm) para los diferentes ciclos realizados.

De los resultados obtenidos se observa que si bien los accionamientos actuales pueden accionar con normalidad la compuerta en su apertura máxima de 90º, no cumplen con el coeficiente de seguridad de 4 exigido para las cadenas. En las condiciones actuales el coeficiente de seguridad es de 2.9 para la apertura de 90º, esperándose poder aumentar a un máximo de 3.2 optimizando la tabla de posición de los motores. El coeficiente de seguridad respecto al par nominal de los motores para una apertura completa de 90º es menor que 1.5.

En los ciclos de 80º y 85º se obtienen valores parecidos en las cargas de las cadenas y pares motores. Obteniéndose un coeficiente de seguridad para las cadenas de 3.5 y coeficiente de seguridad respecto al par nominal de los motores de 1.5. Optimizando la tabla de posiciones se espera poder aumentar algo el coeficiente de seguridad de las cadenas, sin llegar a un valor de 4 para una apertura de 80º. Para mantener el coeficiente de seguridad de las cadenas en 4, debería limitarse el rango de apertura a valores en torno a 75º, posición en la cual estaba antiguamente el límite de apertura de la compuerta.

2.3 CIERRE DE LA COMPUERTA CON TRES MOTORES SIN AYUDA EXTERNA

Para comprobar la posibilidad de cierre de la compuerta mediante 3 motores se realizaron pruebas partiendo de diferentes ángulos de apertura. En dichas pruebas se desactivaba uno de los motores y se liberaba su freno, tratando de mover la compuerta 5º en sentido de cierre con los otros tres motores controlados a velocidad constante de 520rpm desde la botonera manual.

Se realizaron pruebas partiendo de una apertura inicial de 40º, 60º, 70º y 80º, arrastrándose alternativamente los motores M5 y M7 (motores inferiores) pudiéndose mover la compuerta en sentido de cierre en todos los casos. En esta ocasión no se realizaron pruebas de arrastre de los motores superiores ya que en el pasado se habían realizado pruebas de arrastre con esos motores no observándose diferencias respecto al arrastre de los motores inferiores.

Para determinar la resistencia adicional producida por el arrastre de uno de los motores y su transmisión se comparaba la carga resultante total medida en el mismo tramo de cierre realizando el cierre con los cuatro motores y realizando el cierre con tres de ellos. Igualmente se medía la carga registrada en el reductor arrastrado para determinar la carga realmente producida por el arrastre del reductor. De estas dos mediciones se observó que a pesar de que se produce un incremento de entre 4 y 8Ton en la resultante de carga total a la salida de los reductores al realizarse el cierre con tres motores, la carga medida en el reductor arrastrado es menor de 2Ton, siendo la diferencia

entre ambos valores debida a rozamientos adicionales producidos en la compuerta y las cadenas. Este incremento de la carga resistente puede deberse al deficiente sistema de guiado que no garantiza que no se produzcan giros y desplazamientos en la compuerta al producirse un desequilibrio en las cargas de tracción.

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos en la prueba de cierre con tres motores partiendo de una apertura de 80° , así como la comparación de cargas respecto al cierre del mismo tramo con cuatro motores para los cierres desde 80° y para el resto de ensayos. En la tabla final se resumen los valores de incremento de carga obtenidos en el resto de ensayos.

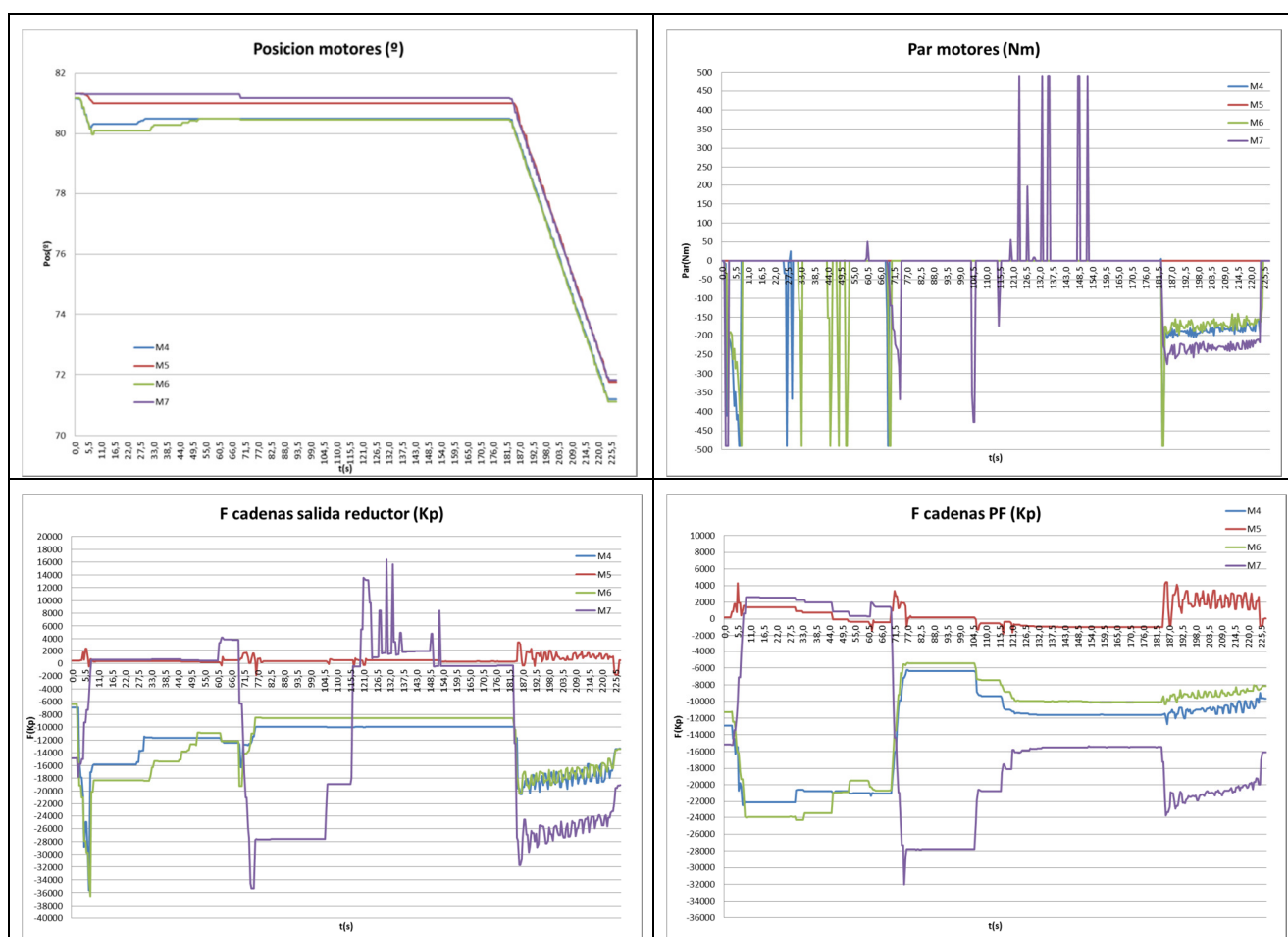


Fig. 2.7 Registros de la compuerta superior durante el proceso de cierre desde 80° hasta 70° arrastrando el motor M5.

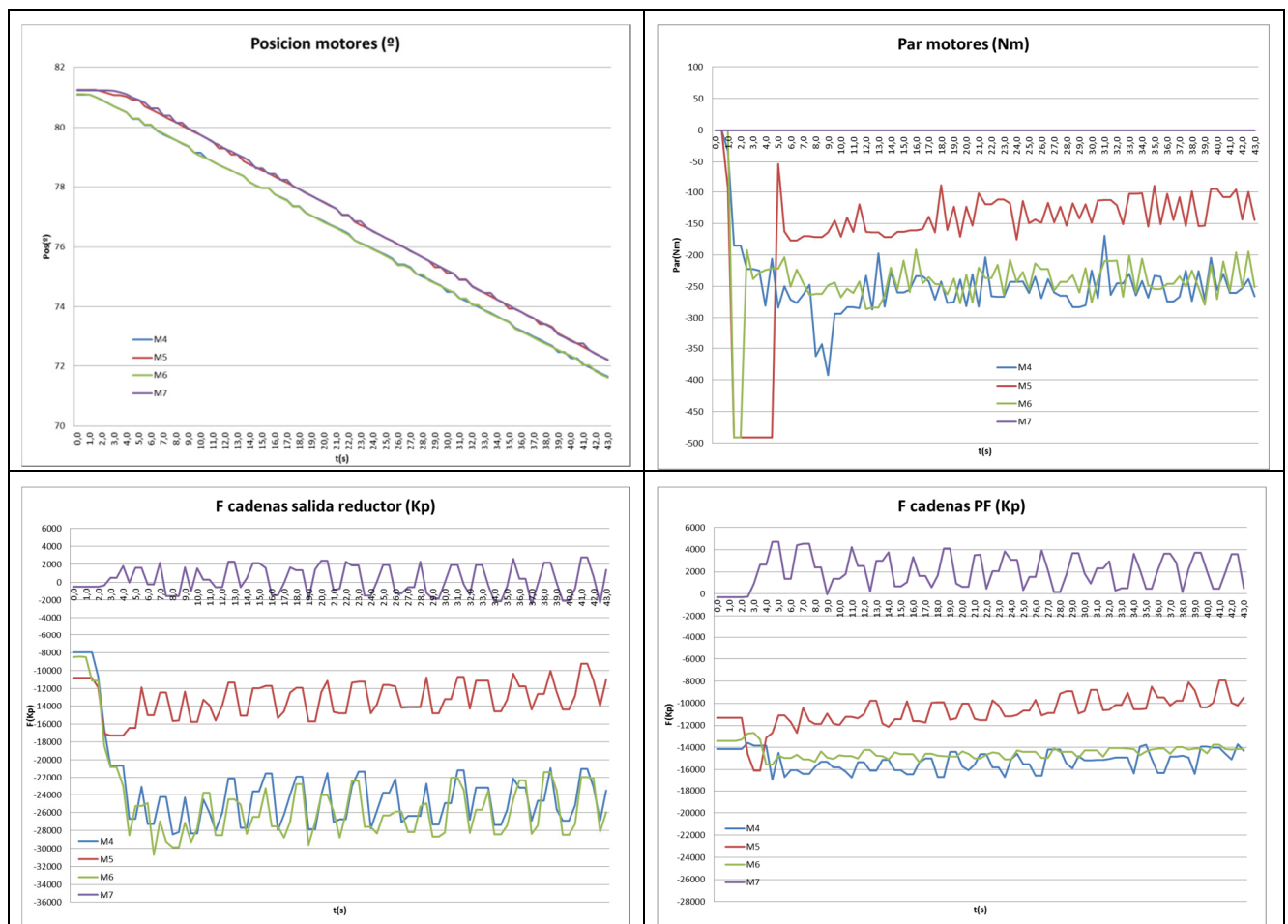


Fig. 2.8 Registros de la compuerta superior durante el proceso de cierre desde 80° hasta 70° arrastrando el motor M7.

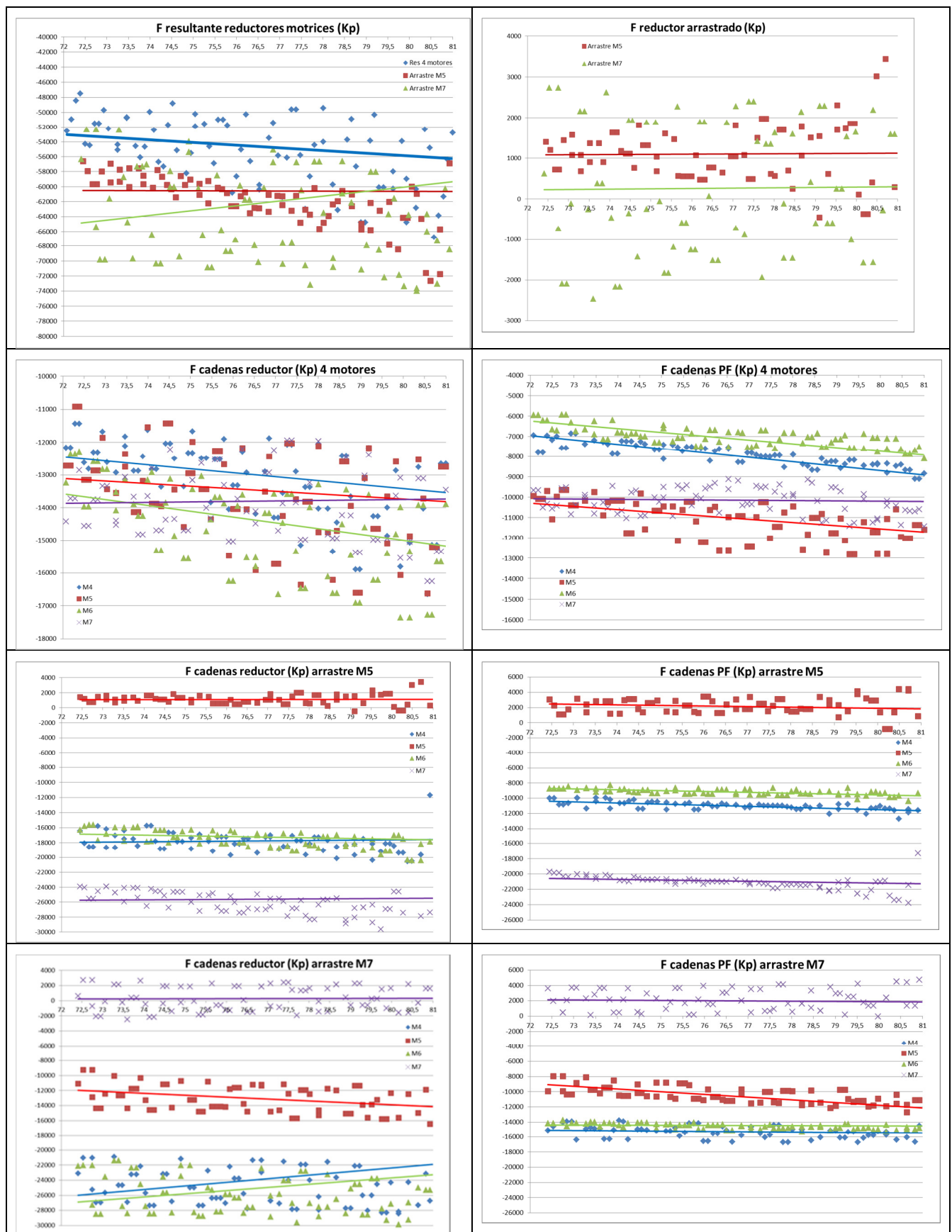


Fig. 2.9 Comparación de las cargas producidas en el sistema al cerrar la compuerta desde 80° hasta 70° con tres motores y con cuatro motores.

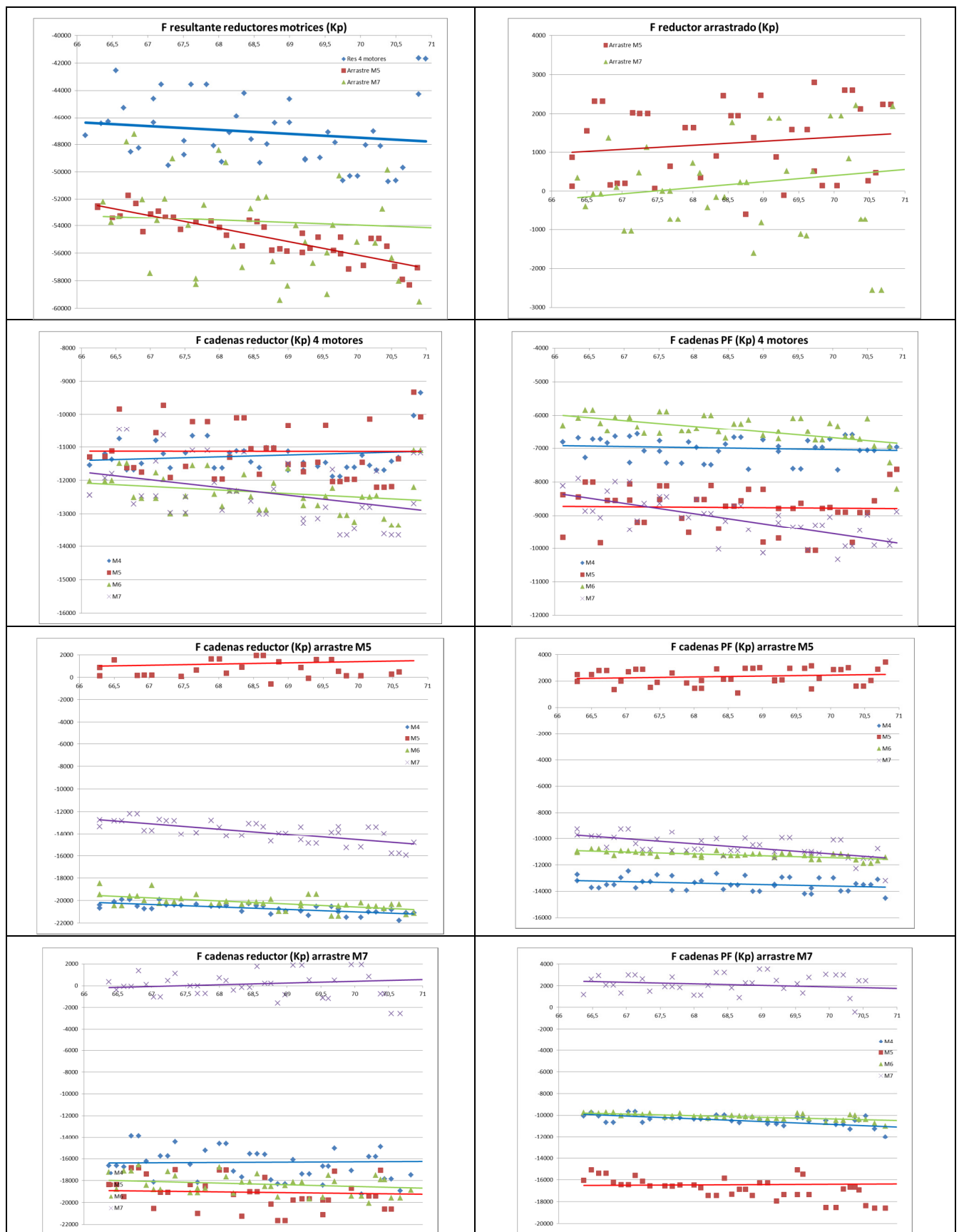


Fig. 2.10 Comparación de las cargas producidas en el sistema al cerrar la compuerta desde 70º hasta 65º con tres motores y con cuatro motores.

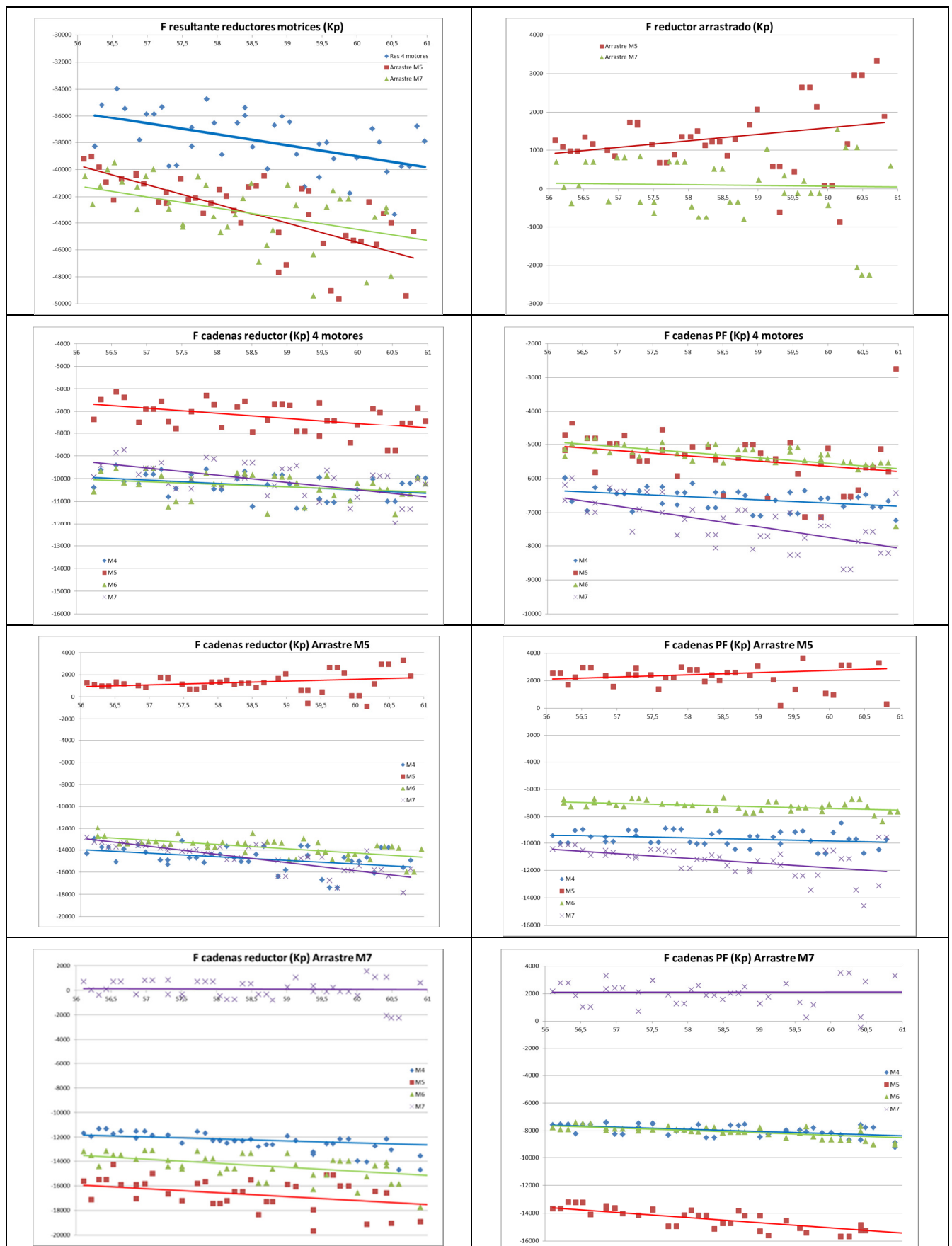


Fig. 2.11 Comparación de las cargas producidas en el sistema al cerrar la compuerta desde 60° hasta 55° con tres motores y con cuatro motores.

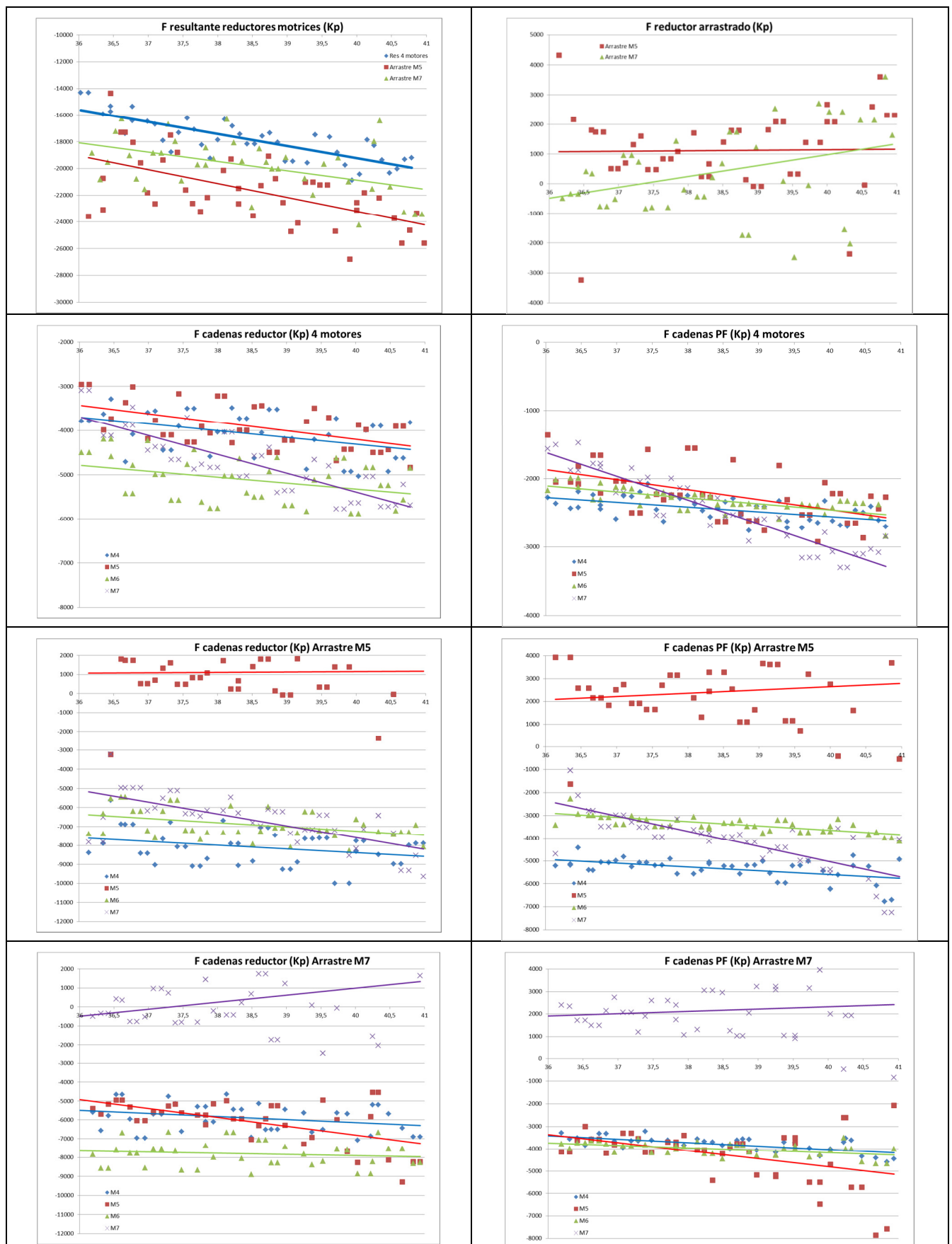


Fig. 2.12 Comparación de las cargas producidas en el sistema al cerrar la compuerta desde 40° hasta 35° con tres motores y con cuatro motores.

	Movimiento	40°-35°	60°-55°	70°-65°	80°-72°
1	Incr. Total Resultante Carga Reductores motrices (Ton)	4	5	8	8
2	Lectura Reductor Arrastrado (Ton)	1	1	1	1
3	Incremento Resistencia Comp+Cadenas: 2-1 (Ton)	3	4	7	7
4	Incr. Friccion Compuerta: Incremento Resultante cadenas Pto. Fijo, incluso cadena arrastrada (Ton)	1	3	4	6
5	Incr. Fricción cadenas: 3-4 (Ton)	2	1	3	1
6	Incr. carga max en cadenas arrastre M5 (Ton)	M4: 4-8	M7: 11-16	M6: 11-21	M7: 14-26
7	Incr. carga max en cadenas arrastre M7 (Ton)	M6: 5-8	M5: 8-17	M5: 11-19	M4: 12-26

Tabla 2.4 Maximos aumentos de carga obtenidos en los movimientos realizados con tres motores respecto al movimiento con cuatro motres en el mismo rango.

2.4 CIERRE DE LA COMPUERTA CON TRES MOTORES CON AYUDA DE UNA GRÚA

Una vez comprobada la capacidad de la compuerta para realizar el cierre con tres motores desde una apertura de 80° se realizaron pruebas de cierre con tres motores desde la apertura total de 90° con la ayuda adicional de una grúa. Para realizar dicha prueba se emplazó una grúa de gran capacidad (Liebherr LTM 1200-5.2) en las proximidades de la cúpula y se abrió completamente la compuerta hasta 90°, fijando la grúa a los enganches existentes en el extremo de la compuerta mediante dos cables de 18m de longitud para reducir la carga horizontal sobre la compuerta. El eje de acimut de la grúa quedo emplazado a una distancia radial de aprox. 10m del pilar de la cúpula, desplegándose la pluma aprox. 40m. En estas condiciones la grúa puede proporcionar un arrastre de elevación mayor de 10Ton.

En esta prueba se arrastró el motor M7 (inferior derecho). Para realizar esta prueba se aplicó una carga vertical mediante la grúa de aprox. 8 Ton a la compuerta (4 Ton a cada lado) y posteriormente se liberó el freno del motor arrastrado. Seguidamente se accionaron los tres motores activos de la compuerta superior para iniciar el cierre. El control de los motores se realizaba a velocidad constante de 520rpm mediante la botonera manual.

Al accionarse los tres motores, la compuerta superior iniciaba el movimiento de cierre al mismo tiempo mediante el control de la grúa se trataba de mantener constante la carga de elevación aplicada siguiendo el movimiento de la compuerta. Con este método se consiguió cerrar la compuerta de manera continua desde 90° hasta 86°, posición en la cual se realizó una parada para equilibrar las cargas de las cadenas actuando de forma individual en los tres motores activos. Posteriormente se realizó otro escalón de cierre con movimiento continuo hasta 81°.



Fig. 2.13 Emplazamiento de trabajo de la grúa utilizada para el arrastre de la compuerta.



Fig. 2.14 Fijación de la grúa a los enganches existentes en el extremo de la compuerta.

La siguiente figura muestra los registros de la posición de la compuerta, el par motor y fuerza en las cadenas a la salida de los reductores y en el punto fijo de la compuerta durante la prueba. Se observan los diferentes pasos aplicados hasta conseguir iniciar el movimiento continuo en la posición de aprox. 86° .

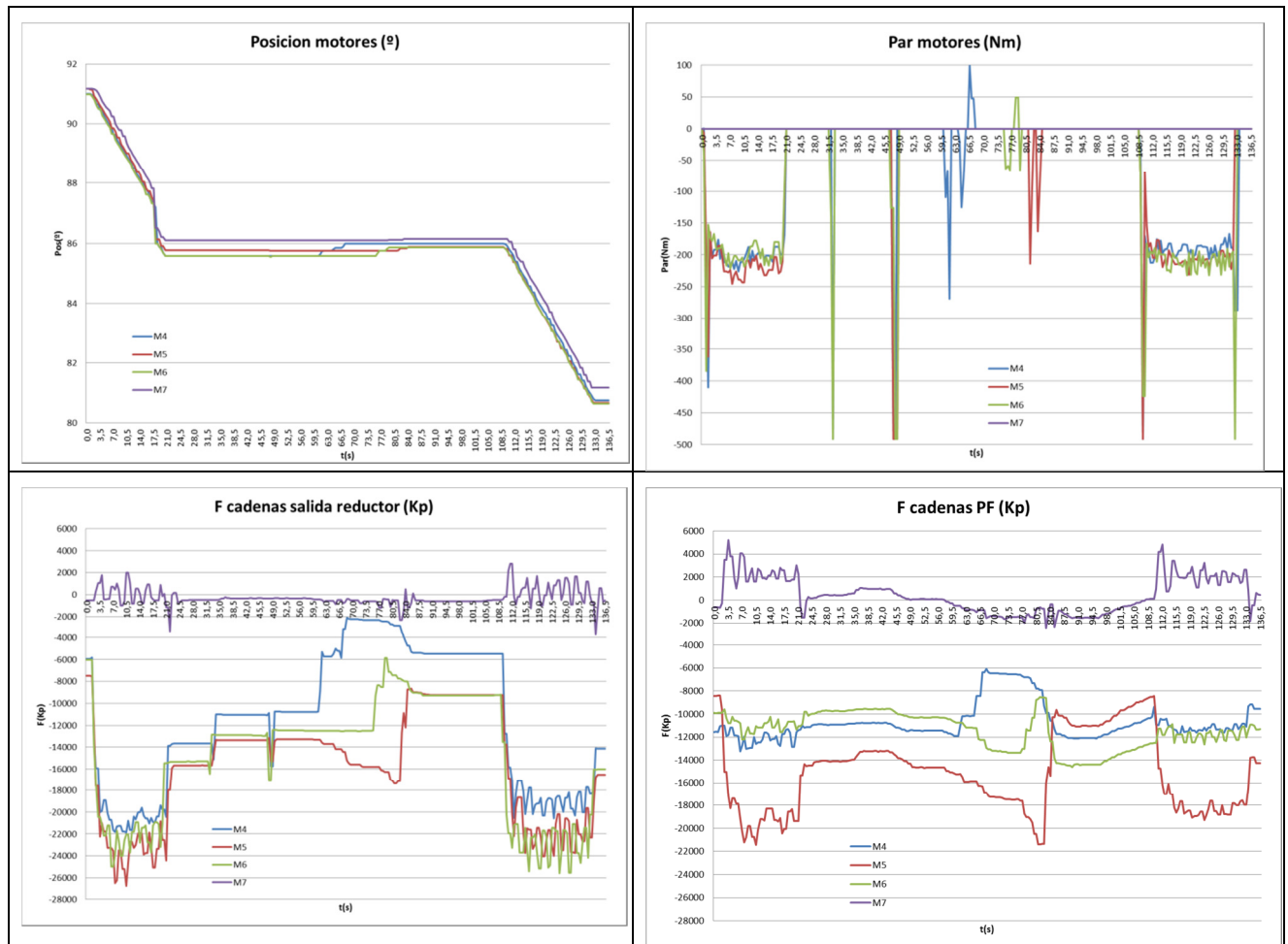


Fig. 2.15 Registros de la compuerta superior durante el proceso de cierre desde 90° hasta 80° arrastrando el motor M7 con ayuda de una grúa.

2.5 CIERRE DE LA COMPUERTA CON TRES MOTORES CON ARRASTRE DE LA COMPUERTA INFERIOR

De manera análoga a la prueba de cierre realizada con tres motores con ayuda de una grúa exterior, se realizó una prueba tratando de cerrar la compuerta desde la apertura completa de 90° con arrastre adicional de la compuerta inferior.

Para ello se fijó la compuerta superior a la compuerta inferior mediante dos eslingas de aprox. 12m de longitud, con una capacidad de carga máxima de 6Ton cada una, fijadas mediante cáncamos dispuestos en los extremos de ambas compuertas. Con esta longitud de eslingas, al situar la compuerta superior en su apertura máxima de 90°, la compuerta inferior quedaba situada a una apertura de 50° desde su posición nominal. En cada una de las eslingas se instaló un dinamómetro para controlar la carga soportada por la unión, evitando sobrepasar la carga de 4Ton en cada eslinga.

En esta prueba se arrastró el motor M5 (inferior izquierdo). Para iniciar el cierre se liberó el freno del motor arrastrado y se liberaron los frenos de los motores de la compuerta inferior, quedando la compuerta inferior soportada mediante la compuerta superior. Posteriormente se accionaron los motores de la compuerta inferior tensando las eslingas hasta obtener una carga de aprox. 4Ton en cada una, controlada mediante los dinamómetros. Una vez tensadas las eslingas se desconectaban los motores de la compuerta inferior y se accionaban los tres motores activos de la compuerta superior para iniciar el cierre. El control de los motores se realizaba a velocidad constante mediante la botonera manual.

Al accionarse los tres motores, la compuerta superior iniciaba el movimiento hasta que se paraba por sobrecarga de alguno de los motores. En ese punto se trataba de igualar la carga de las cadenas actuando sucesivamente de forma individual en los 3 motores activos de la compuerta y se realizaba un nuevo paso tensando las eslingas mediante los motores de la compuerta inferior accionándose posteriormente los tres motores activos de la compuerta superior hasta que volvían a parar por sobrecarga. De esta forma en pasos sucesivos la compuerta se consiguió cerrar desde 90° hasta 86°, posición desde la cual se consiguió iniciar un movimiento continuo de cierre en el cual no se produjeron más paradas por sobrecarga. La prueba se detuvo a 72° ya que en esa posición ya se había comprobado el cierre mediante 3 motores sin ayuda de sistemas externos.

El procedimiento de cierre descrito fue necesario debido a la dificultad para sincronizar el movimiento simultaneo de ambas compuertas.



Fig. 2.16 Disposición de una de las fijaciones entre la compuerta superior (izquierda) e inferior (derecha) al iniciar la maniobra de cierre.

La siguiente figura muestra los registros de la posición de la compuerta, el par motor y fuerza en las cadenas a la salida de los reductores y en el punto fijo de la compuerta durante la prueba. Se observan los diferentes pasos aplicados hasta conseguir iniciar el movimiento continuo en la posición de aprox. 86° .

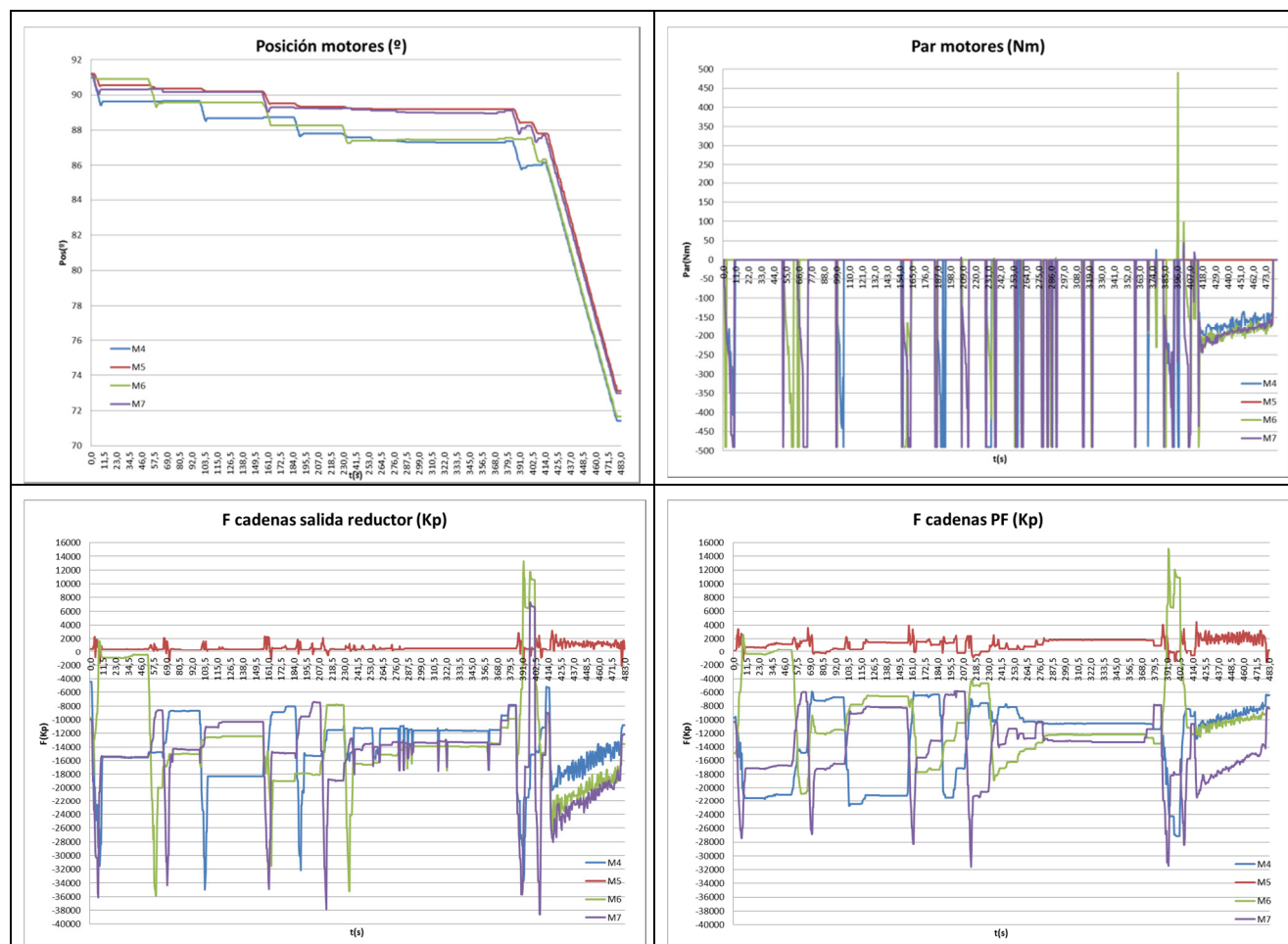


Fig. 2.17 Registros de la compuerta superior durante el proceso de cierre desde 90° hasta 80° arrastrando el motor M5 con ayuda de la compuerta inferior.

Durante las pruebas se observó que una vez tensadas las eslingas mediante los motores de la compuerta inferior, al desactivar estos motores y antes de accionar los motores de la compuerta superior, la compuerta inferior retrocedía debido a la elasticidad de las eslingas ya que los frenos de la compuerta inferior estaban liberados, reduciéndose de esta forma la carga efectiva de arrastre de la compuerta inferior sobre la compuerta superior. A pesar de ello se consiguió mover la compuerta superior con tres motores, si bien el proceso resultó más complicado que el caso del cierre con ayuda de una grúa externa.

Para mejorar la eficacia del sistema de remolque mediante la compuerta inferior pueden considerarse dos modos de operación diferentes:

- Arrastre mediante los motores de la compuerta inferior
- Arrastre por peso propio de la compuerta inferior

Estas dos variantes de arrastre no han sido probadas, pero se espera que mejorarían los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

2.5.1 Arrastre mediante los motores de la compuerta inferior

Este método consistiría en arrastrar la compuerta superior mediante los motores de la compuerta inferior sin aprovechar el peso de la compuerta inferior como fuerza de remolque adicional. La variante respecto al procedimiento probado es que en este caso no se liberarían los frenos de la compuerta inferior, sino que serían comandados de forma normal junto a los motores.

El método consistiría en tensar las eslingas mediante los motores de la compuerta inferior, controlando su carga mediante dinamómetros y una vez tensadas las eslingas, parar los motores manteniendo los frenos fijados. De esta forma se mantiene la tensión de las eslingas y de las cadenas de la compuerta inferior y se evita el retroceso de la compuerta inferior. Seguidamente se accionan los motores activos de la compuerta superior, proporcionando la energía elástica almacenada en las eslingas y en las cadenas de la compuerta inferior un arrastre adicional a la compuerta superior.

Para poder almacenar más energía elástica y disponer de mayor capacidad de arrastre, puede aumentarse la longitud de las eslingas. Sin embargo al aumentar la longitud de las eslingas si bien se puede almacenar más energía elástica, la fuerza de arrastre efectiva resulta menos eficiente ya que aumenta el ángulo formado entre la dirección de la eslinga y la dirección del movimiento. Aumentando la longitud de las eslingas de 12m hasta 18m el ángulo entre la dirección del movimiento y la eslinga pasa de 20° a 30°.

Un posible inconveniente de este método de operación es el aumento de la tensión de las eslingas ante un eventual retroceso de la compuerta superior, lo cual podría producir la rotura de las mismas. A pesar de ello, este modo de operación resulta más seguro que el arrastre por el peso propio de la compuerta inferior, ya que en ese caso una eventual rotura de una eslinga produciría la caída libre de la compuerta inferior. Por tanto se recomienda este modo de operación en el caso de requerirse arrastre auxiliar para la compuerta superior, tomándose precauciones en el aparcado del telescopio para proteger los elementos sensibles del impacto de la eventual rotura de una eslinga. Igualmente las personas que intervengan en esta maniobra deben situarse en posiciones seguras para protegerse del impacto que pueda producir la eventual rotura de una eslinga.

Para aplicar este procedimiento debe asegurarse que tanto las eslingas, como los elementos de enganche adicionales, tengan una capacidad de carga de al menos 6Ton y no superar las 5Ton de carga aplicada en cada eslinga, comprobando la lectura en los dinamómetros.

2.5.2 Arrastre por peso propio de la compuerta inferior

Este método consistiría en arrastrar la compuerta superior mediante el peso propio de la compuerta inferior sin utilizar los motores de la compuerta inferior como elementos adicionales de arrastre. Para ello se suspendería la compuerta inferior de la compuerta superior manteniendo los frenos liberados de la compuerta inferior, tal como se hizo en las pruebas realizadas. En este caso el peso propio de la compuerta inferior proporciona la fuerza de arrastre adicional a la compuerta superior.

Tal como ocurre en el modo de operación por arrastre mediante los motores de la compuerta inferior, una eventual retroceso de la compuerta superior aumentaría la tensión de las eslingas tratando de elevar la compuerta inferior. En este caso la fuerza necesaria para arrastrar la compuerta inferior sería mayor a la fuerza neta proporcionada por la compuerta inferior para el arrastre de la compuerta superior debido a que debería vencerse la resistencia de la transmisión. Este aumento de la carga en las eslingas podría ser muy elevado para posiciones bajas de la compuerta inferior, pudiendo romper las eslingas, produciéndose la caída libre de la compuerta inferior.

La siguiente figura muestra la fuerza resultante neta disponible para el arrastre de la compuerta superior dependiendo de la posición de la compuerta inferior así como la fuerza necesaria para el arrastre de la compuerta inferior por parte de la compuerta superior en el caso de un eventual retroceso de la compuerta superior. Estos valores corresponden al modelo de carga de la compuerta inferior elaborado con las mediciones realizadas en la compuerta inferior previamente a la calibración de las celdas de carga de sus cadenas y debe confirmarse una vez calibradas las celdas de carga.

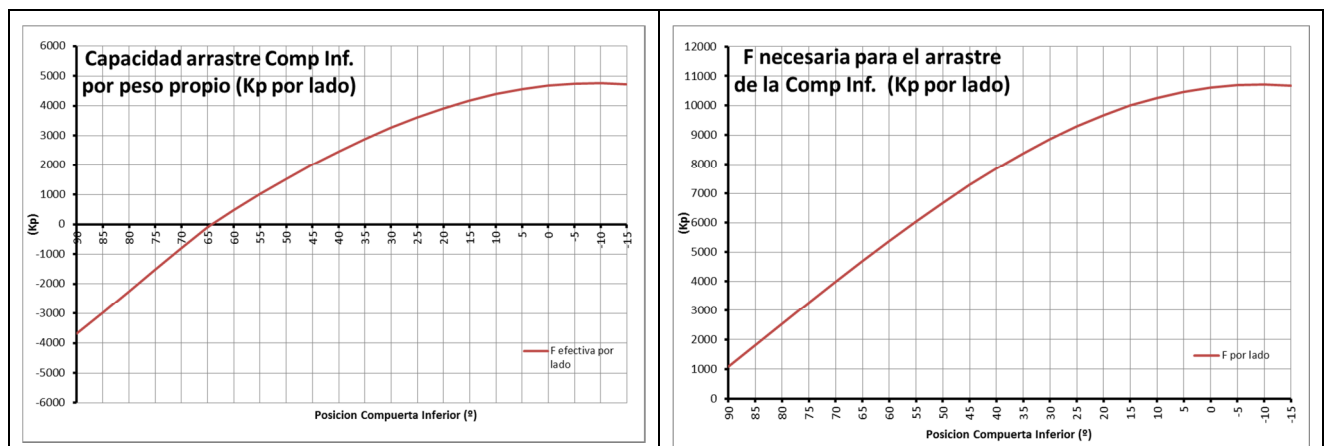


Fig. 2.18 Fuerza resultante neta en cada lado de la compuerta inferior disponible para el arrastre de la compuerta superior dependiendo de la posición de la compuerta inferior (izquierda) y fuerza necesaria para arrastrar la compuerta inferior por parte de la compuerta superior (derecha) en el caso de retroceso de la compuerta superior.

La fuerza neta disponible para el arrastre depende de la posición de la compuerta inferior, siendo mucho mayor para posiciones bajas de dicha compuerta. Para aumentar la capacidad de arrastre mediante el peso propio de la compuerta inferior puede aumentarse la longitud de las eslingas, permitiendo la operación de la compuerta inferior siempre en ángulos bajos donde resulta más eficiente. El inconveniente de trabajar en ángulos bajos de la compuerta inferior es la elevada fuerza que se requeriría para arrastrar esta compuerta por parte de la compuerta superior en un eventual retroceso de la compuerta superior, lo cual produciría tensiones inadmisibles en las eslingas. Tal como se comentó en el caso anterior, el aumento de la longitud de las eslingas tiene como contrapartida adicional un aumento del ángulo entre la eslinga y la dirección del movimiento, resultando menos eficiente.

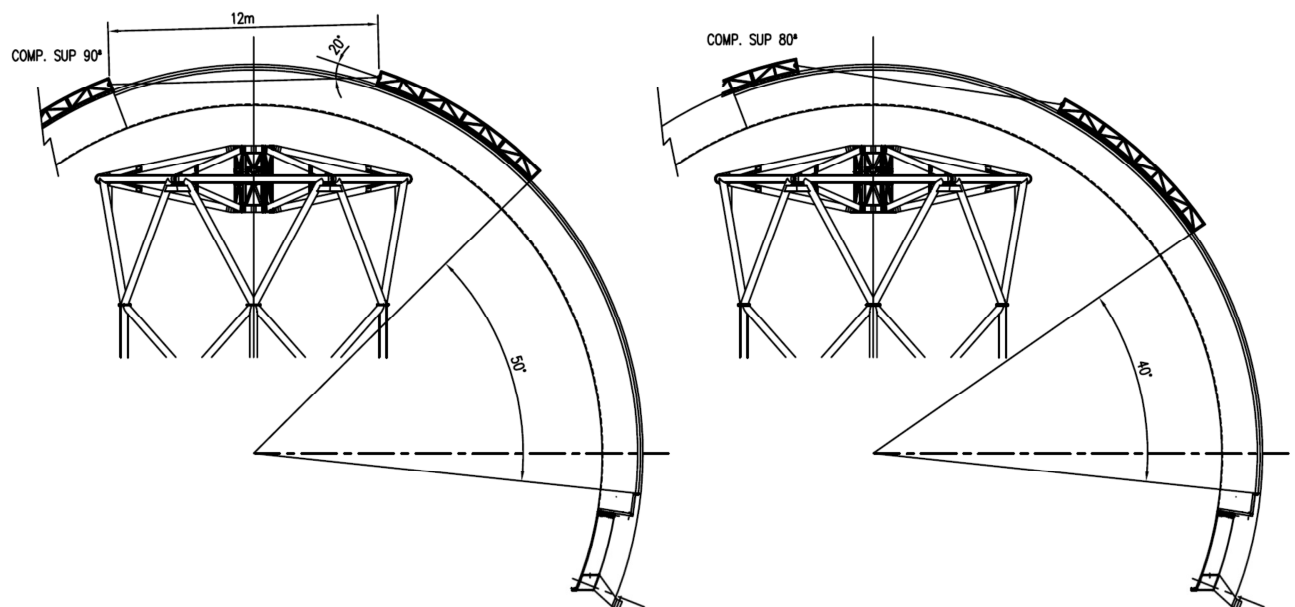


Fig. 2.19 Arrastre de la compuerta superior mediante la compuerta inferior con eslingas de 12m de longitud, partiendo de la posición de apertura total de 90° (izquierda) y de la posición de apertura de 80° (derecha). En la posición de apertura total, la compuerta inferior queda posicionada a 50°, proporcionando una carga de arrastre neta de 1.4Ton a cada lado. En la posición de apertura de 80°, la compuerta inferior queda posicionada a 40°, proporcionando una carga de arrastre neta de 2.2Ton a cada lado. El eventual retroceso de la compuerta superior arrastrando la compuerta inferior produciría una fuerza en las eslingas de 7Ton ($6.5/\cos(20^\circ)$) en el primer caso y 8.5Ton ($8/\cos(20^\circ)$) en el segundo caso.

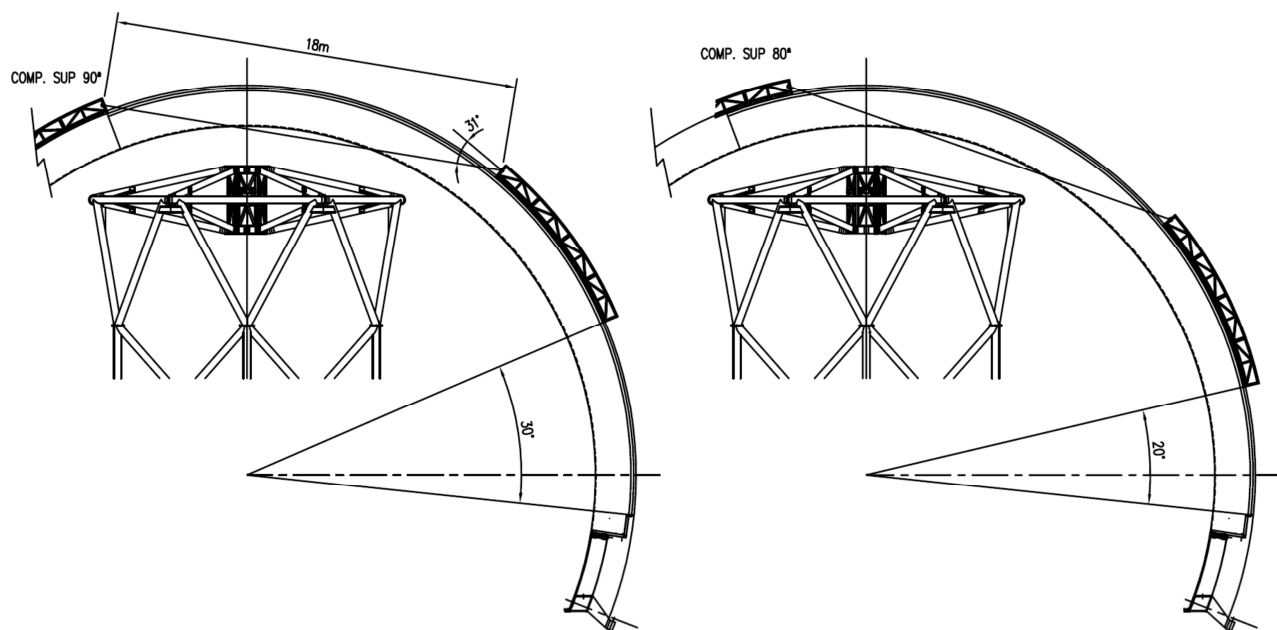


Fig. 2.20 Arrastre de la compuerta superior mediante la compuerta inferior con eslingas de 18m de longitud, partiendo de la posición de apertura total de 90°(izquierda) y de la posición de apertura de 80° (derecha). En la posición de apertura total, la compuerta inferior queda posicionada a 30°, proporcionando una carga de arrastre neta de 3Ton a cada lado. En la posición de apertura de 80°, la compuerta inferior queda posicionada a 20°, proporcionando una carga de arrastre neta de 3.7Ton a cada lado. El eventual retroceso de la compuerta superior arrastrando la compuerta inferior produciría una fuerza en las eslingas de 10.4Ton ($9/\cos(30^\circ)$) en el primer caso y 11.2Ton($9.7/\cos(30^\circ)$) en el segundo caso.

La ventaja de este modo de operación respecto al de arrastre mediante los motores de la compuerta inferior, es la sencillez de operación, ya que la compuerta inferior actúa como un elemento pasivo en el cual no es necesario realizar ninguna maniobra. En este caso el accionamiento se limita a los motores activos de la compuerta superior.

El principal inconveniente de este método es la falta de seguridad ante un eventual retroceso de la compuerta superior arrastrando la compuerta inferior, lo cual podría producir la rotura de las eslingas, produciéndose la caída libre de la compuerta inferior. Por tanto no se recomienda el uso de este modo de operación como sistema de arrastre auxiliar de la compuerta superior.

2.6 PRUEBA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DE MOTORES MEDIANTE SEGUIDOR COMPENSADOR DE VELOCIDAD

2.6.1 Rango de apertura 70°

Durante los días 15 y 16 de enero de 2014 se realizaron pruebas de una nueva estrategia de control de los motores de la compuerta superior basada en motores seguidores compensadores de velocidad (speed trim follower).

El objetivo de estas pruebas era determinar la viabilidad de aplicar esta estrategia de control en la compuerta superior para mejorar el reparto de cargas entre los cuatro accionamientos respecto a las estrategias de comando en velocidad pura o comando mediante tabla de posiciones que se habían venido utilizando hasta la fecha.

La estrategia de control por seguidores compensadores de velocidad se utiliza típicamente para uniformizar el reparto de cargas en sistemas flexibles dotados de varios accionamientos, en los cuales no es factible el uso de una estrategia de control por par. Una aplicación típica de esta estrategia es el control de tracción de grandes grúas pórtico.

La estrategia consiste en comandar el motor maestro a velocidad constante y realizar correcciones en la demanda de velocidad de los demás motores en función de la diferencia de par detectada entre el motor maestro y los motores esclavos. En los casos en que se detecta una menor carga en los esclavos se aceleran para incrementar su carga,

mientras que en los casos en que se detecta una mayor carga en los esclavos se reduce su velocidad para descargarlos.

En las pruebas realizadas se definió un lazo de compensación independiente en cada lado de la compuerta, de forma que los motores inferiores M5 y M7 se definieron como maestros y los motores superiores M4 y M6 como esclavos. M5 y M7 estaban comandados a velocidad constante $V_n=520\text{rpm} = 13.65^\circ/\text{min}$ en la compuerta.

Para realizar la corrección de velocidad en los motores esclavos se definió un controlador proporcional integral en el PLC de los accionamientos, según la siguiente ley de control:

$$V_0=V_n$$

$$V_i=V_{i-1}-K_{int}\cdot(\Delta\Gamma_i)-K_p\cdot(\Delta\Gamma_i-\Delta\Gamma_{i-1})$$

Siendo V_i la demanda de velocidad del motor esclavo en el instante i , K_{int} y K_p las ganancias de la compensación integral y proporcional y $\Delta\Gamma_i$ la diferencia de par medida entre el motor esclavo y el motor maestro ($\Gamma_{M4}-\Gamma_{M5}$ o $\Gamma_{M6}-\Gamma_{M7}$) en el instante i .

Los mejores resultados de compensación de carga se obtuvieron despreciando la corrección integral aplicando únicamente un control proporcional puro con $K_p= 0.76\text{rpm}/\text{Nm}= 0.02(^\circ/\text{min compuerta})/\text{Nm}$ equivalente a la siguiente expresión:

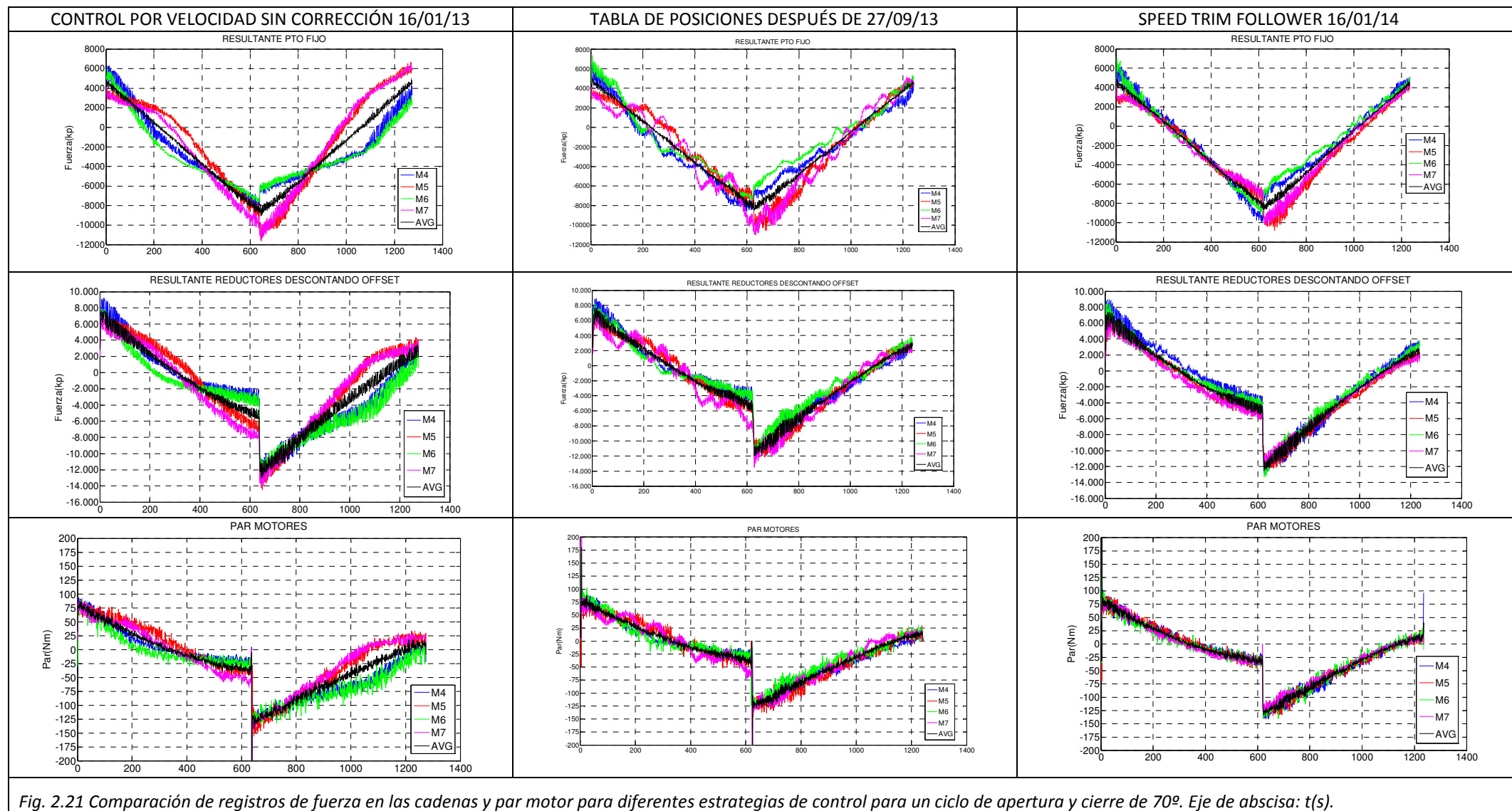
$$V_i=V_{i-1}-K_p\cdot(\Delta\Gamma_i-\Delta\Gamma_{i-1})=V_n-K_p\cdot(\Delta\Gamma_i)$$

Para filtrar las oscilaciones de par instantáneas producidas en los motores, la estimación de la diferencia de par $\Delta\Gamma_i$ se realizaba promediando 4 valores instantáneos de par correspondientes a un periodo de 2s (frecuencia de muestreo = 2Hz). Las oscilaciones de par instantáneas están relacionadas con el paso de la cadena y a la velocidad de operación de 520rpm tienen una frecuencia aprox. de 1Hz. La corrección de la demanda de velocidad se realizaba cada 4s, en base a la diferencia de par $\Delta\Gamma_i$ promediada en los 2s inmediatamente anteriores a la corrección. La corrección de velocidad se iniciaba transcurridos 6s desde el inicio del movimiento para evitar incluir en la corrección los transitorios de arranque de los motores. La corrección de la demanda de velocidad se limitó a un máximo de $\pm 19\text{rpm}$ ($\pm 0.5^\circ/\text{min}$).

Las siguientes figuras presentan las cargas en las cadenas y en los motores obtenidas durante las pruebas realizadas con la configuración descrita para un ciclo de apertura y cierre de la compuerta de 70° . En estas figuras se comparan las cargas obtenidas con la estrategia de control por seguidores compensadores de velocidad con las cargas obtenidas con las estrategias de control anteriores por velocidad pura o por tabla de posiciones. En la serie de gráficos se observa el comportamiento global en todo el ciclo de apertura y cierre, mientras que en la segunda serie de gráficos se detalla el comportamiento en la zona de máxima apertura, al iniciarse el ciclo de cierre, zona en la cual se registran las mayores cargas.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la uniformidad del reparto de cargas entre los cuatro accionamientos respecto a las estrategias anteriores, siendo las diferencias de carga observadas entre los accionamientos del mismo orden de las fluctuaciones de carga instantáneas que se producen en cada accionamiento. Estos resultados demuestran la viabilidad del uso de esta estrategia como modo de control a implementar en las próximas reformas del sistema. Igualmente a corto plazo se propone implementar esta estrategia de control, frente al control por tabla de posiciones, para la extensión del rango actual de apertura de la compuerta más allá de los 70° actuales.

Se espera que los resultados obtenidos puedan mejorarse optimizando la ganancia de corrección proporcional e incluyendo una fracción de control integral. También se propone ensayar la estrategia descrita usando un solo lazo de compensación para toda la compuerta, en lugar de uno por cada lado, de forma que exista un solo motor maestro y tres motores esclavos. Esta implementación simplificaría la estrategia de control y podría permitir la operación de emergencia con tres motores garantizando incluso en este caso un reparto equilibrado de cargas. Esta operación sería factible si el sistema de guiado de la compuerta se hubiese mejorado y permitiese guiar correctamente la compuerta a pesar del arrastre diferencial que se produjera en ambos lados de la compuerta.



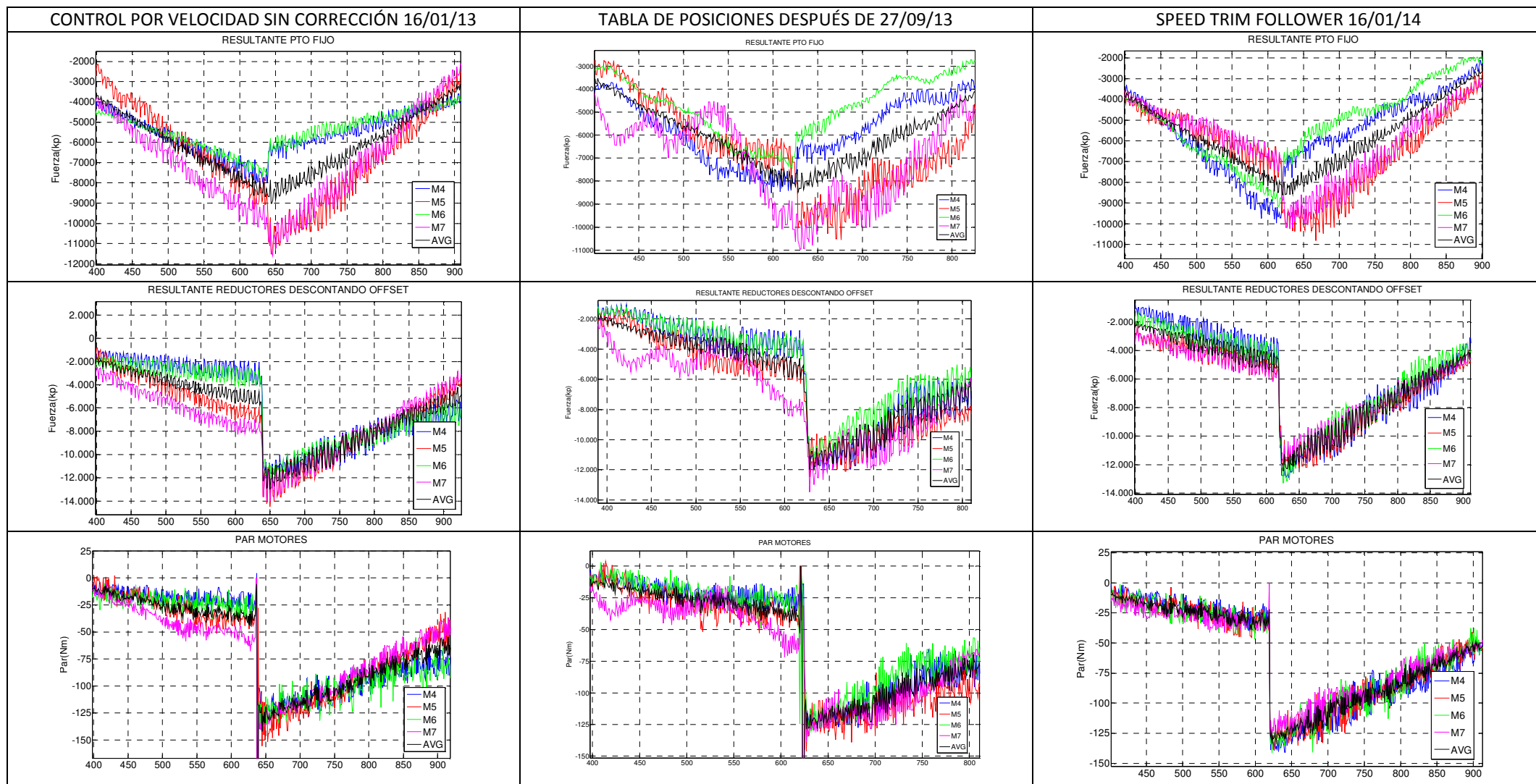


Fig. 2.22 Comparación de registros de fuerza en las cadenas y par motor para diferentes estrategias de control para un ciclo de apertura y cierre de 70°. Ampliación de la zona de inversión del movimiento. Eje de abscisa: $t(s)$.

2.6.2 Rango de apertura 86º

Durante los días 6 y 7 de mayo de 2014 se realizaron pruebas de la nueva estrategia de control en un rango de apertura y cierre extendido de 86º. En la siguiente figura se presentan las cargas en las cadenas y en los motores obtenidas durante las pruebas realizadas.

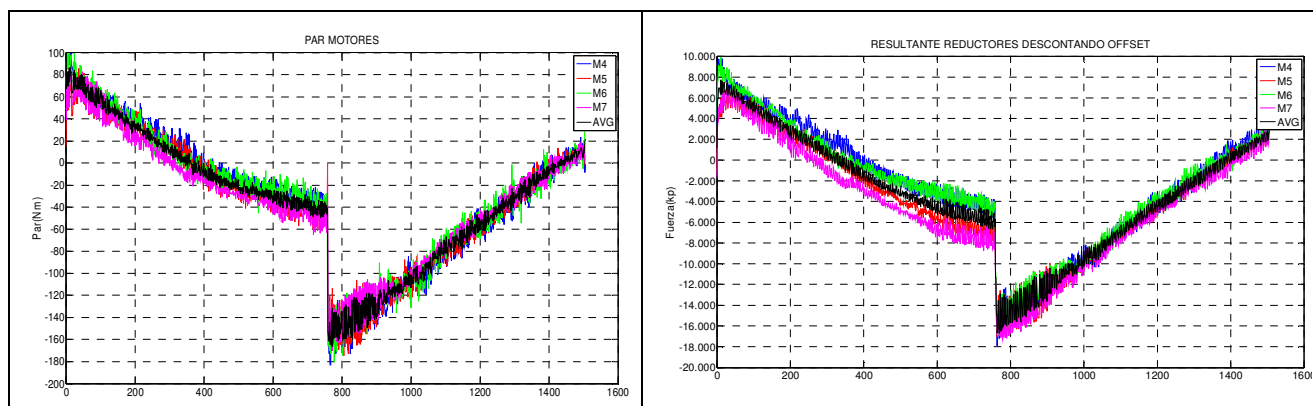


Fig. 2.23 Registros de par motor (izq) y fuerza en las cadenas (der) para un ciclo de apertura y cierre de 86º. Eje de abscisa: t(s).

Para realizar estas pruebas se aumentó la precarga de las cadenas como medida de seguridad ante la falta de dispositivos tensores que recojan el tramo de cadena destensada, pasando de valores del orden de 2-2.5Ton a valores de 3-3.5Ton. A partir de los datos de carga en las cadenas, se obtiene el rozamiento en la transmisión. Debido al aumento de precarga, se observa un aumento del rozamiento de las cadenas, especialmente en los motores superiores M4 y M6, pasando de valores de aprox. 2Ton a valores superiores a 3Ton.

	Precarga (Ton)	Rozamiento (Ton)
M4	3.5	3.6
M5	3	2
M6	3	3.3
M7	3.7	2.2

Tabla 2.5 Precarga y rozamiento observados en las cuatro cadenas de la compuerta superior.

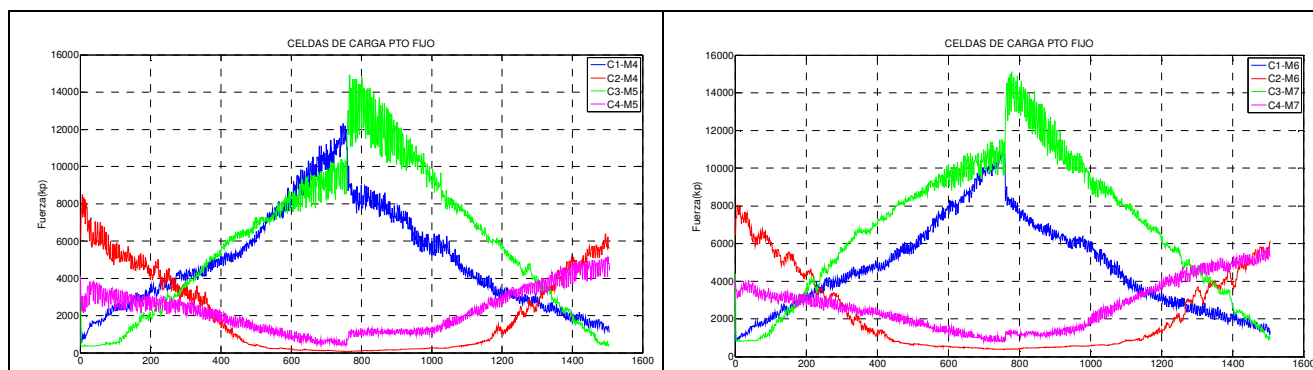


Fig. 2.24 Registros de las fuerzas de las cadenas en el punto fijo. En estos gráficos se observa la precarga actual de las cadenas (M4: 3.5Ton; M5: 3Ton; M6: 3Ton; M7: 3.7Ton).

3. CONCLUSIONES

Variando la tabla de posiciones de control de los motores se ha conseguido abrir y cerrar con normalidad la apertura completa de la cúpula (90º), sin embargo el coeficiente de seguridad en la carga de las cadenas obtenido en este caso es de 2.9, no cumpliéndose el factor de seguridad de 4 exigido. Con la nueva tabla de posiciones, puede incrementarse el rango de apertura actual de 70º hasta 75º garantizando un coeficiente de seguridad cercano a 4 en las cadenas o hasta 80º reduciendo el coeficiente de seguridad hasta aprox. 3.5.

En las mediciones de par máximo de los motores se ha observado que los motores proporcionan un par máximo aprox. un 15% inferior al par máximo esperado, sin embargo se ha comprobado que la capacidad de los motores es suficiente para proporcionar los picos de par necesarios para cerrar de la compuerta con 3 motores en situaciones de emergencia desde una posición de apertura de 80º sin ayuda de medios de arrastre auxiliares.

Con ayuda de una grúa o con la tracción adicional de la compuerta inferior se ha conseguido cerrar la compuerta con tres motores desde la posición de apertura completa de 90º, probándose la utilidad de estos sistemas como elementos auxiliares de cierre en casos de emergencia. La compuerta inferior es menos efectiva como sistema de arrastre auxiliar que la grúa debido a la imposibilidad actual de sincronización de los movimientos de ambas compuertas.

Debido al deficiente estado del sistema de guiado, durante el movimiento es necesario guiar la compuerta igualando la tracción aplicada a ambos lados para evitar el giro de la misma. Debido a ello, al realizarse el cierre con tres motores, el motor del lado que trabaja en solitario debe proporcionar el doble de tracción que los motores del lado contrario. En el caso de que los problemas de guiado actuales se hubiesen corregido, no sería necesario cerrar la compuerta con la misma tracción en los dos lados, ya que el correcto guiado evitaría el giro de la compuerta. Esto permitiría repartir la carga total de la compuerta igualmente entre los 3 motores disponibles en ese momento, lo cual reduciría de forma importante la sobrecarga del accionamiento que trabaja en solitario.

Las pruebas de la estrategia de control por seguidor compensador de velocidad han demostrado que esta estrategia es más efectiva para conseguir un reparto equilibrado de la carga entre los cuatro accionamientos que las estrategias usadas hasta la fecha. Se propone implementar esta estrategia de control a corto plazo para incrementar el rango de apertura actual de 70º.

4. ANEXO: ARCHIVOS DE DATOS

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
ArrastreReductores70deg_221013.xls	Pruebas de par máximo de los motores y fuerza máxima en las cadenas. Pruebas de arrastre de un reductor en posiciones 70º, 60º y 40º.
Apertura70degNuevaTablaPosicion2Hz.xlsx Apertura70degNuevaTablaPosicion2Hz_MLAB.txt	Ciclo de apertura y cierre de 70º con nueva tabla de posiciones.
80deg015_2.xlsx 80deg015_2_MLAB.txt	Ciclo de apertura y cierre de 80º con nueva tabla de posiciones.
85deg015_2.xlsx 85deg015_2_MLAB.txt	Ciclo de apertura y cierre de 85º con nueva tabla de posiciones.
90deg015_2.xlsx 90deg015_2_MLAB.txt	Ciclo de apertura y cierre de 90º con nueva tabla de posiciones.
80deg3mot.xlsx	Cierre con tres motores desde una apertura de 80º.
90deg3mot.xlsx	Cierre con tres motores desde una apertura de 90º con ayuda de grúa y con arrastre de compuerta inferior.
SpeedFOLLOWER_70deg.xlsx SpeedFOLLOWER_70deg_MLAB.txt	Ciclo de apertura y cierre de 70º con estrategia de control Speed Trim Follower
SpeedFOLLOWER_86deg.xlsx SpeedFOLLOWER_86deg_MLAB.txt	Ciclo de apertura y cierre de 86º con estrategia de control Speed Trim Follower
AnalisisCompuerta.m	Rutina Matlab para analizar la carga en las cadenas.

Los archivos _MLAB.txt tienen el formato adecuado para ser utilizados por la rutina de Matlab "AnalisisCompuerta.m".