

Capítulo 7. - CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL CONJUNTO MECANISMO BASE Y VÁLVULA DE SINCRONIZACIÓN

La caracterización experimental del comportamiento global de un mecanismo simple “péndulo doble”* accionado por dos cilindros oleohidráulicos y controlado con la ayuda del conjunto válvula de sincronización, hizo indispensable construir un banco de pruebas que permitiera someter al sistema a diferentes condiciones de carga, siempre dentro de los límites de potencia disponibles y en el rango de operatividad propenso del sistema a ensayar.

7.1.Descripción

El banco de pruebas está constituido por los subconjuntos, tal como puede observarse en la fotografía de la figura 7.1

Estos subconjuntos son:

1. Bancada
2. Sistema óleo – hidráulico
3. Subconjunto mecanismo base
4. Sistema de control
5. Instrumentación
6. Sistema de adquisición de datos



Figura 7.1 - Fotos del mecanismo base

* El desarrollo de este apartado ha sido posible gracias a la colaboración de las empresas Palas BMH (Poleñino – Huesca) Hidráulica Aragón (Zaragoza) que han aportado sus conocimientos y medios materiales en la construcción de los prototipos y equipos auxiliares

7.1.1. Bancada

La bancada consiste en una estructura metálica compuesta por 16 vigas de perfil IPN 100, de 1200 mm de longitud, dispuestas en paralelo, una al lado de la otra y separadas entre si 20 mm, de tal manera que configuran una superficie plana de dimensiones de 2000 mm de largo por 1200 mm de ancho. El conjunto viene rigidizado por dos vigas IPN 300 soldadas transversalmente.

7.1.2. Sistema oleohidráulico

El sistema oleohidráulico que nos permite poner en movimiento el mecanismo base consta de los siguientes elementos (en la figura 7.2, estos elementos están referenciados con números):

- Válvula de control de dirección proporcional para la elevación (4)
- Válvulas reductoras de presión (5)
- Manómetros (6)
- Válvula de sincronización (7)
- Válvula de control de dirección proporcional para la inclinación y volteo del elemento terminal (13)
- Válvula antirretorno pilotadas doble (14)
- Cilindro de elevación (16)
- Cilindro de inclinación / volteo (17)
- Central oleohidráulica (A)

7.1.3. Subconjunto mecanismo base

Este subconjunto esta constituido por los siguientes elementos:

1. **Pilar soporte** (18) – Está constituido por dos vigas UPN 160, 1000 mm de altura, separados mediante dos rigidizadores horizontales de 400 mm de longitud y de sección rectangular, el superior de 60x60 mm y el inferior de 120x120 mm, y soldadas a una base de plancha laminar de 700 mm x 700 mm x 20mm. Esta base está montada sobre la bancada mediante 18 tornillos M 8x8
2. **Brazo de elevación** (12) – Está constituido por una barra circular de Ø100 mm exterior y Ø70 mm interior con una longitud de 2550 mm. En un extremo tiene un

pivote de 380 mm de longitud, que permite articular el brazo al pilar soporte, y en otro extremo tiene una base rectangular de 380 mm de longitud por 120 de ancho con dos orejas separadas 322 mm utilizados para articular el elemento terminal. El pivote y la base están rigidizada al brazo por dos piezas, una a cada lado, cuya forma geométrica es triangular rectangular de 141 mm de base, 300 mm de altura y 80 mm de grosor. Al brazo está soldada una oreja de 1825 mm de longitud, la cual es utilizada para articular el cilindro de elevación por el lado vástago.

3. *Soporte del elemento terminal* – Consiste en un marco rectangular de 1200 mm de largo por 660 mm de ancho, construido por 6 perfiles rectangulares, dos horizontales de 1220 mm de largo, 100 mm de ancho y 50 de grosor, y cuatro verticales de 460 mm de altura, 100 mm de ancho y 50 mm de grosor, con separación entre ellos de 300 mm en los extremos y 200 mm en la parte media. En la parte central se han soldados unos soportes que permite su unión al brazo de elevación mediante varios pasadores / horquillas. El soporte del elemento terminal ha sido equipado con una cesta construida por perfiles rectangulares que permite poner carga al mecanismo base.

7.1.4. Sistema de control

El sistema de control está constituido con los siguientes equipos:

1. *PLC GE – Fanuc serie 90 – 30* – Para la automatización del sistema, se ha creído conveniente utilizar un PLC, tipo GE – Fanuc serie 90 – 30. Se trata de un autómata de tipo modular con conexión en un rack de 10 slots, denominado placa base, que a su vez es interconectable mediante un conector de expansión hasta un máximo de 4 racks.

Las funciones básicas encomendadas al PLC son

- Generar señales analógicas de comando para las tarjetas electrónicas de las válvulas de control de dirección proporcional.
- Monitorización con el objetivo de mantener las variables del sistema dentro de las márgenes previstas y evitar cualquier incidencia que pueda poner en peligro la seguridad del personal

Los elementos básicos de conexión son: fuente de alimentación, CPU, módulos I/O

Tarjeta electrónica – El movimiento de los cilindros de elevación e inclinación / volteo, independientemente de la válvula de sincronización, se controlan mediante dos válvulas de control de dirección proporcional y sus correspondientes tarjetas electrónicas. La alimentación de las válvulas de control de dirección proporcional es realizada con la tarjeta de alimentación CAID 11 / 24P, la cual es apta para el mando de dos electroimanes independientes con posibilidad de realizar las siguientes funciones: sistema de control, trigger, rampas y compensada en intensidad.

7.1.5. Instrumentación

Los sensores / transductores instalados en el montaje experimental son los siguientes:

1. **Transductores de presión** – Los transductores de presión utilizados son del tipo piezoresistivo, en particular de la marca **KELLER Serie - 21R**.

Los transductores de presión utilizados en la fase experimental se caracterizan por: Alimentación / Salida = 8 – 28 voltios / 4 – 20 mA (2 hilos), Linealidad = ± 0.2 % (típica) / ± 0.5 % (máxima) y los siguientes rangos de presión

<i>Referencia</i>	<i>Rango de Presión</i>
A	0 – 250 bar
B	0 – 400 bar
C	0 – 100 bar
D	0 – 100 bar
E	0 – 250 bar
F	0 – 100 bar

<i>Ecuaciones de ajuste de los transductores de presión</i>	
<i>P (presión en bar)</i>	
<i>V (voltaje en volt)</i>	
<i>Referencias</i>	<i>Ecuaciones</i>
A	$P = 65.120V - 65.121$
B	$P = 104.66V - 105.94$
C	$P = 26.129V - 26.375$
D	$P = 26.266V - 26.591$
E	$P = 65.310V - 65.095$
F	$P = 26.001V - 26.788$

Tabla 7.1 – Ecuaciones de ajuste de los transductores de presión

Todos estos transductores se han calibrado en la instalación descrita en el apartado B.1.1 y de acuerdo con el protocolo descrito en el apartado B.1.2 en anexo B

En la Tabla 7.1 se encuentran las ecuaciones de ajuste y su representación gráfica de los ensayos de calibración correspondiente a los transductores de presión utilizados, se encuentran en el apartado B.1.3 (anexo B).

2. *Sensores de desplazamiento* – Los sensores de desplazamiento utilizados en la fase experimental son del tipo magnetoestrictivo, en particular de la marca **Temposonics R – Series, Analógicos**. La posición sin contacto con el cilindro elimina el desgaste, el ruido y los problemas erróneos de la señal.

Los sensores de desplazamiento utilizados han sido los siguientes:

<i>Modelo</i>	<i>Rango de medidas</i>
Temposonics – RP Colocado en el cilindro de elevación	50 – 600 mm
Temposonics – RH Colocado en el cilindro de inclinación / volteo)	50 – 935 mm

Todos ellos tienen una alimentación / salida = 0 – 10 voltios / 4 – 20mA, con una Linealidad $\leq 0.02\%$ F.S.(mínimo $\pm 50 \mu\text{m}$), Repetibilidad $\leq 0.001\%$ F.S.(mínimo $\pm 2.5 \mu\text{m}$), e Histerisis $\leq 4 \mu\text{m}$

Todos estos sensores de desplazamiento se han calibrado en la instalación descrita en el apartado B.2.1 y de acuerdo con el protocolo descrito en el apartado B.2.2 (anexo B).

En la Tabla 7.2 se encuentran las ecuaciones de ajuste y su representación gráfica que corresponde a los ensayos de calibración de los sensores de desplazamiento utilizados, se encuentra en el apartado B.2.3 (anexo B)

<i>Ecuaciones de ajustes de los sensores de desplazamiento</i> <i>X (desplazamiento en mm)</i> <i>V (voltaje en volt)</i>	
<i>Referencias</i>	<i>Ecuaciones</i>
Temposonics RP (cilindro de elevación)	$X = 61.892V + 586.84$
Temposonics RH (cilindro de inclinación / volteo)	$X = 93.485V + 925.45$

Tabla 7.2 – Ecuaciones de ajuste de los sensores de desplazamiento

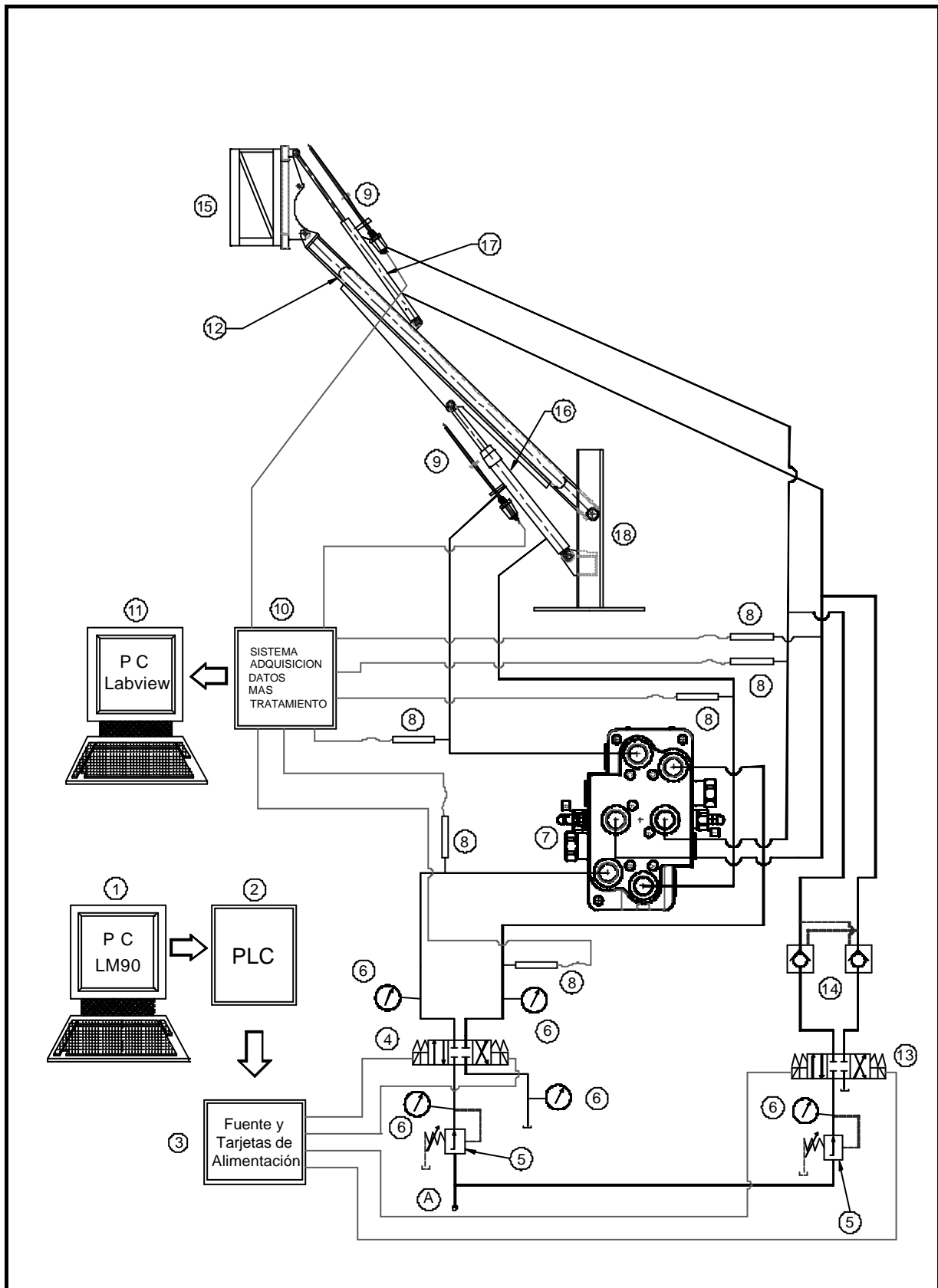


Figura 7.2 – Esquema del ensayo del mecanismo base y el sistema oleohidráulico de sincronizado

7.1.6. Sistema de adquisición de datos

1. *Tarjetas de adquisición de datos.* – Las tarjetas de adquisición de datos permiten comunicar el PC con el sistema. Entre las funciones básica encomendadas a las tarjetas destacan: recibir datos del sistema, generar señales y observar las respuestas del sistema

Las características más importantes de la tarjeta utilizada en la fase experimental en esta tesis doctoral se resumen en la tabla 7.3

<i>Tarjeta PCI 6035E</i>	
Entradas analógicas	16 single – Ended / 8 diferenciales Resolución: 16 bits Frecuencia de muestreo: 200 kS/s Rango de entrada: ± 0.05 a ± 10 V
Salidas analógicas	2 Resolución: 12 bits Frecuencia de escritura: 10 kS/s Rango de salida: ± 10 V
Contadores / Timers	2,24 bits
I / O digitales	8
Triggers	Digital

Tabla 7.3 – Características de la tarjeta de adquisición de datos

2. *Sistema de filtrado* – Consiste de una placa en la que se incluyen 8 filtros pasa bajo cuya referencia es FBU-8. Cada canal consiste de un amplificador de instrumentación de ganancia diferencial programable seguida de un filtro pasa bajo butterworth de tercer orden, también programable.

El amplificador de instrumentación manifiesta un excelente rechazo en modo común y un amplio rango de ganancia que va desde 1 hasta 1000. Incorpora un protector de sobrecarga hasta ± 40 voltios. La frecuencia de corte del filtro de pasa bajo, se selecciona insertando una resistencia SIL formada por una red de resistencias de valor adecuado en un conector. Los rangos de frecuencia de corte van desde 5Hz hasta 10KHz. La salida del filtro está protegida contra cortocircuitos y puede conducir cargas tan bajas como 600 Ω .

En la figura 7.3 se presenta el diagrama de bloques del filtro

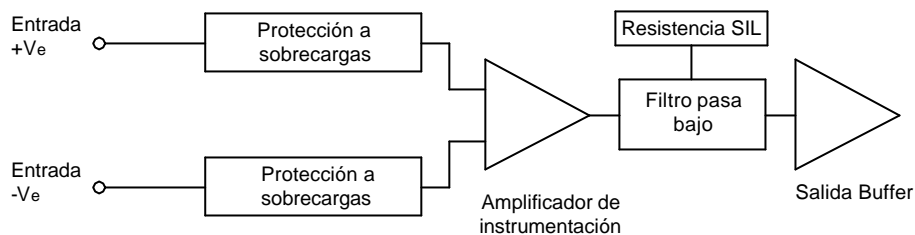


Figura 7.3 – Diagrama de bloques del filtro

Amplificador de Instrumentación:

Cada canal filtro consta de un amplificador de instrumentación diferencial. La ganancia del amplificador de instrumentación es completamente ajustable por el usuario colocando y soldando una resistencia estándar entre los terminales etiquetados como RG.

La ganancia del amplificador es calculada por la siguiente ecuación:

$$\text{Ganancia} = 1 + (50\text{k}\Omega / \text{RG})$$

Siendo RG el valor de la resistencia estándar colocados entre las terminales etiquetados con la misma designación.

Filtro pasa bajo:

El filtro de pasa bajo de tercer orden es programable por el usuario utilizando una red de resistencia Single-in-line (SIL). Esta red de resistencia consta de 4 resistencias aisladas de igual valor.

Las características más relevantes de esta placa de filtros son:

- Filtros Butterworth de tercer orden
- Consta de amplificadores de instrumentación para señales diferenciales
- Protección para sobrecargas de entrada de hasta ± 40 voltios
- Ganancia de los amplificadores programable por el usuario desde 1 hasta 1000 mediante una resistencia estándar.
- Frecuencia de corte programables por el usuario mediante una resistencia SIL para valores de 5Hz hasta 10KHz

3. **Programa de adquisición de datos y de control** – Para recibir los datos del sistema, generar señales y observar el comportamiento del sistema, se ha creído conveniente utilizar el programa LabView el cual es un sistema de programación de carácter general con amplia librerías de funciones para la adquisición, análisis y presentación

de datos y control de instrumentos, siendo éste un software de National Instrumentals Corporate. El programa ha sido desarrollado para que el usuario pueda configurar todos los parámetros relevantes.

7.2. Protocolos

Para la valoración del comportamiento global del mecanismo base y el sistema oleohidráulico para la sincronización se ha diseñado tres tipos de ensayos específicos:

- a. Ensayo específico para la caracterización del comportamiento
- b. Ensayo específico para valorar la repetibilidad del comportamiento
- c. Ensayo específico para valorar el comportamiento con carga

Previo a los ensayos específicos, es requisito imprescindible seguir un protocolo de puesta en marcha común a todos los ensayos específicos.

7.2.1. Protocolo de puesta en marcha

El protocolo de puesta en marcha comprende los siguientes puntos:

1. Verificar que el conexionado de los flexibles estén bien colocados y los rácores bien apretados.
2. Poner en marcha el mecanismo a velocidad lenta y comprobar que no haya aire en el interior del circuito y no haya fugas de aceite
3. Abrir el programa LM – 90 y transferir la configuración desde el programador PC al autómat. Cabe destacar que la utilización de una rampa de tensión en el proceso de bajada del brazo de elevación, se puede producir una respuesta muy brusca del mecanismo debido a la acción de fuerzas exteriores, como por ejemplo el peso. Por tanto se debe comprobar que el valor de tensión aplicado a la válvula sea el indicado para que el brazo baje de una forma suave.
4. Verificar que los sensores de desplazamiento y los transductores de presión transmitan las señales durante el movimiento del brazo
5. Estabilizar la temperatura de trabajo del aceite en 40° C.

6. Verificar que la presión de trabajo del sistema transmitida por la central oleohidráulica se mantiene alrededor del 90 bar, lo cual es conseguido con la ayuda de la válvula reductora de presión.

7.2.2. Protocolo de los ensayos específicos

a) Ensayo específico para la caracterización del comportamiento

La realización de este ensayo comprende los siguientes pasos:

1. Comprobar que las dos válvulas de control de dirección proporcional están en la posición neutra.
2. Regular la válvula de sincronización (7) actuando sobre los estranguladores de aguja. Estos configuran una parte de los divisores de caudal. Esta regulación debe realizarse con la ayuda de un micrómetro. Los valores a ajustar se determinan previamente de acuerdo con los objetivos del ensayo.
3. Con la válvula de control de dirección proporcional (13) se mueve el soporte del elemento terminal hasta la posición vertical (considerada como referencia)
4. Introducir los datos de control al programa LM – 90 de tal forma que permita iniciar la subida y bajada del brazo de acuerdo con la velocidad requerida
5. Definir el tiempo de captura de datos en el programa de adquisición de datos.
6. Poner en marcha la máquina procediendo a la captura de datos a través del programa LabView.
7. Una vez capturados los datos a una determinada velocidad, se repiten los pasos 3, 4 y 6 para otras velocidades.
8. Si se desea evaluar el comportamiento del sistema para otra combinación de ratios de las válvulas divisoras de caudal, se repiten los pasos de la 2 a la 6.
9. En todos los casos, introducir los datos obtenidos en “Excel” para su posterior procesado.
10. Procesar los datos utilizando las ecuaciones de ajuste obtenidos en la calibración de los sensores de desplazamiento y de los transductores de presión, las cuales se encuentran en los apartados I.1.3 y I.2.3 (Anexo B).

b) Ensayo específico para valorar la repetibilidad del comportamiento

La realización de este ensayo comprende los siguientes pasos:

1. Comprobar que las dos válvulas de control de dirección proporcional están en la posición neutra.
2. Regular la válvula de sincronización (7) actuando sobre los estranguladores de aguja. Estos configuran una parte de los divisores de caudal. Esta regulación debe realizarse con la ayuda de un micrómetro. Los valores a ajustar se determinan previamente de acuerdo con los objetivos del ensayo.
3. Con la válvula de control de dirección proporcional (13), se mueve el soporte del elemento terminal hasta la posición vertical (considerada de referencia)
4. Introducir los datos de control al programa LM – 90 de tal forma que permita iniciar la subida y bajada del brazo de acuerdo con la velocidad requerida
5. Definir el tiempo de captura en el programa de adquisición de datos para cada dos movimientos de subida y bajada del brazo, poner en marcha la máquina y proceder a la captura de datos a través de programa LabView.
6. Capturar las señales de los movimientos de subida y bajada para un número predeterminado de ciclos. En general, se propone capturar los ciclos 1-2, 5-6, 10-11, 15-16, 20-21, 25-26, 30-31. cabe señalar que, después de la captura de señales de un ciclo (dos subidas y dos bajadas), el brazo continuaba subiendo y bajando con el programa detenido, pero que al iniciar el siguiente ciclo predeterminado, se le aplicaba “run” para proceder a la captura de datos de los respectivos ciclos de subidas y bajadas.
7. Proceder según los pasos 9 y 10 de la rutina del ensayo específico citado en el apartado 7.3.2.1.

c) Ensayo específico para valorar el comportamiento con carga

La realización de este ensayo comprende los siguientes pasos:

1. Colocar en la cesta del elemento terminal una carga compuesta por placas metálicas de forma rectangular (280mm x 280mm y 20 mm de espesor)
2. Comprobar que las dos válvulas de control de dirección proporcional están en la posición neutra.

3. Regular la válvula de sincronización (7) actuando sobre los estranguladores de aguja con la ayuda de un micrómetro. Los valores a ajustar se determinan previamente de acuerdo con los objetivos del ensayo.
4. Con la válvula de control de dirección proporcional (13) se mueve el soporte del elemento terminal hasta la posición vertical (considerada como referencia)
5. Introducir los datos de control al programa LM – 90 de tal forma que permita iniciar la subida y bajada del brazo de acuerdo con la velocidad requerida
6. Definir el tiempo de captura de datos en el programa de adquisición de datos.
7. Capturar los movimientos de subidas y bajadas para un número predeterminado de ciclos. En general se propone capturar las señales de los ciclos 1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30. Cabe señalar que, después de la captura de señales de un ciclo (una subida y una bajada), el brazo continuaba subiendo y bajando con el programa detenido, pero que al iniciar el siguiente ciclo predeterminado, se le aplicaba “run” para proceder a la captura de datos de los respectivos ciclos de subida y bajada.
8. Si se desea evaluar el comportamiento del sistema para otra combinación de ratios de las válvulas divisoras de caudal, se repiten los pasos de la 3 a la 7.
9. Proceder según los pasos 8 y 9 de la rutina del ensayo específico citado en el apartado 7.3.2.1.

7.3. Metodología de tratamiento de los datos obtenidos

7.3.1. Tipología de resultados experimentales obtenidos

Las gráficas de las figuras 7.4 y 7.5, presentan la evolución del desplazamiento de los cilindros de elevación e inclinación / volteo, sin carga y con carga, respectivamente, en el elemento terminal. Mientras que las gráficas de las figuras 7.6 y 7.7 representan la evolución de las presiones y que corresponden con los desplazamientos dados por los cilindros oleohidráulicos, cuyas representaciones gráficas son dadas en las figuras 7.4 y 7.5, todos ellos obtenidos a través de los datos capturados con el programa LabView.

Las gráficas de las figuras de la 7.8 a la 7.11, representan las velocidades de los cilindros oleohidráulicos durante la subida y bajada del brazo. Estos gráficos son ejemplos típicos para cuando el elemento terminal se encuentra sin carga (figura 7.8 y 7.9) y con carga (figuras 7.10. y 7.11) de acuerdo a una velocidad preestablecida dada al sistema con la introducción de los datos de control al programa de automatización LM-90.

Las gráficas antes mencionadas, es una tipología de los resultados experimentales obtenidos que sirvieron de base para determinar los parámetros que permiten analizar el comportamiento global del mecanismo base acoplado a un sistema oleohidráulico de sincronización.

A continuación se explica como se han manipulado numéricamente los datos experimentales con el objetivo de obtener:

- Inclinación o volteo del elemento terminal
 - El caudal dividido durante la subida del brazo de elevación
 - El caudal dividido durante la bajada del brazo de elevación
- a). Cálculo de la inclinación / volteo del elemento terminal

Con los datos de desplazamiento de los cilindros de elevación e inclinación / volteo, capturados con el programa de adquisición de datos, se determina el giro que va adquiriendo el elemento terminal, mediante las siguientes fórmulas:

Para determinar el ángulo θ se utiliza el teorema de los cosenos (ver figura 7.12):

$$\cos\theta = \frac{X_E^2 - (\overline{O_2O_4})^2 - (\overline{O_4A})^2}{-2(\overline{O_2O_4} * \overline{O_4A})} \quad (1)$$

En donde:

X_E – es el desplazamiento del cilindro de elevación (mm)

$$\overline{O_2O_4} = 310\text{mm}$$

$$\overline{O_4A} = 1135\text{mm}$$

$$\theta_{(\text{grados})} = \frac{\theta_{(\text{radian})} * 180}{\pi} \quad (2)$$

Para obtener el ángulo entre el eje del brazo y el eje del pilar soporte

$$\theta' = \theta_{(\text{grados})} + \alpha + 30.5358 \quad (3)$$

En donde

$$\alpha = 5.4^\circ$$

$$\text{tg}^{-1}\left(\frac{\overline{OO_2}}{\overline{OO_4}}\right) = 30.5358^\circ$$

$$\overline{OO_2} = 157.5\text{mm}$$

$$\overline{OO_4} = 267\text{mm}$$

Para determinar el ángulo φ (ver figura 7.12) se aplica la ecuación:

$$\cos\varphi = \frac{X_V^2 - (\overline{BC})^2 - (\overline{CD})^2}{-2(\overline{BC})(\overline{CD})} \quad (4)$$

En donde

X_V – desplazamiento del cilindro de inclinación / volteo (mm)

$$BC = 1052.21 \text{ mm}$$

$$CD = 515 \text{ mm}$$

Para obtener el ángulo φ_C , se aplica la ecuación:

$$\varphi_C = \theta' + (180 - \delta - \varphi) \quad (5)$$

En donde

$$\delta = 6.713^\circ$$

El giro del elemento terminal se evalúa mediante la ecuación:

$$\gamma_{\text{incl/volteo}} = \left\{ \varphi_C + \text{sen}^{-1}\left(\frac{\overline{CC'}}{\overline{CD}}\right) - 180 \right\} \quad (6)$$

donde:

$$\overline{CC'} = 50\text{mm} \text{ y } \overline{CD} = 515\text{mm}$$

- b). Q'_1 (ver figura 7.13b), caudal que sale de la cámara del pistón del cilindro de elevación y posteriormente dividido por la válvula divisora de caudal izquierda

$$Q'_1 = V_{XE} * S_{\text{pistón-elev}} \quad (10)$$

En donde

$$V_{XE} = \frac{\Delta X_E}{\Delta T} \text{ es la velocidad del cilindro de elevación}$$

$S_{\text{pistón-elev}} = 4417.856 \text{ mm}^2$ – es el área de la cámara del pistón del cilindro de elevación

- c). El caudal Q'_2 – caudal dividido por la válvula divisora de caudal izquierda que sale por la toma F de la válvula de sincronización hacia la cámara del vástago del cilindro de inclinación / volteo.

$$Q'_2 = V_{XV} * S_{\text{pistón-vástago-volteo}} \quad (11)$$

En donde

$$V_{XV} = \frac{\Delta X_V}{\Delta T} \text{ es la velocidad del cilindro de inclinación / volteo}$$

$S_{\text{pistón-vástago-volteo}} = 1099.56 \text{ mm}^2$ – es el área de la cámara del vástago del cilindro de inclinación / volteo.

- d). El caudal Q'_3 – caudal dividido en la válvula divisora izquierda, sale por la toma B de la válvula de sincronización hacia el depósito.

$$Q'_3 = Q'_1 - Q'_2$$

- e). El caudal Q_1 (ver figura 7.13a), que sale de la cámara del vástago del cilindro de elevación y posteriormente dividido por la válvula divisora de caudal derecha:

$$Q_1 = V_{XE} * S_{\text{pistón-vást-elev}} \quad (7)$$

Donde,

$$V_{XE} = \frac{\Delta X_E}{\Delta T} \text{ es la velocidad del cilindro de elevación}$$

$S_{\text{pistón-vást-elev}} = 3161.23 \text{ mm}^2$ - es el área de la cámara del vástago del cilindro de elevación.

- f). El caudal Q_2 – caudal dividido en la válvula divisora de caudal derecha y que sale por la toma E hacia la cámara del pistón del cilindro de inclinación / volteo.

$$Q_2 = V_{XV} * S_{\text{pistón-volteo}} \quad (8)$$

Donde

$$V_{XV} = \frac{\Delta X_V}{\Delta T} \text{ es la velocidad del cilindro de inclinación / volteo}$$

$S_{\text{pistón-volteo}} = 1590.431 \text{ mm}^2$ – es el área de la cámara del pistón del cilindro de inclinación / volteo

- g). El caudal Q_3 – caudal dividido por la válvula divisora derecha que sale por la toma D de la válvula de sincronización hacia el depósito.

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 \quad (9)$$

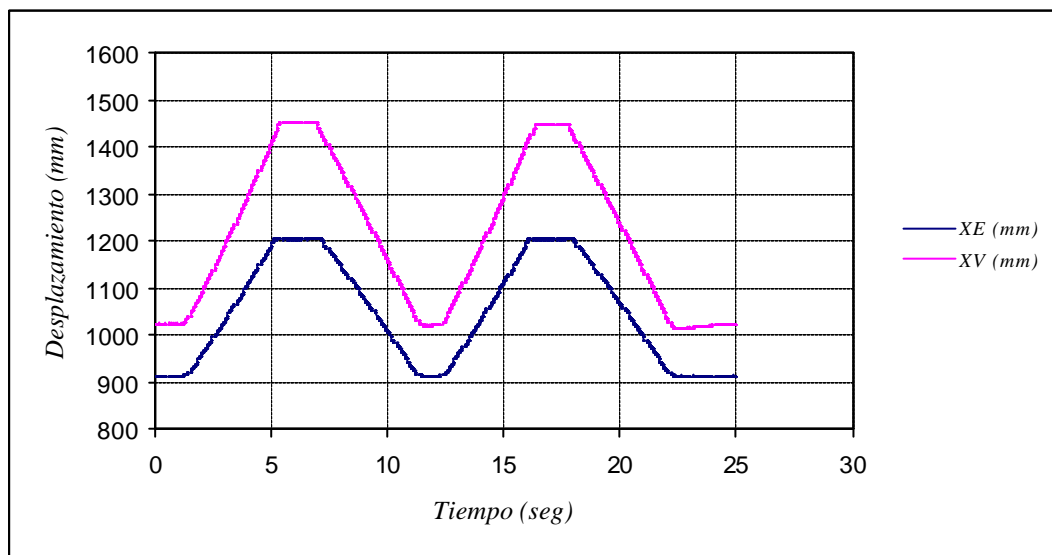


Figura 7.4 – Representación gráfica del desplazamiento de los cilindros oleohidráulicos para un ciclo de dos subidas y dos bajadas sin carga

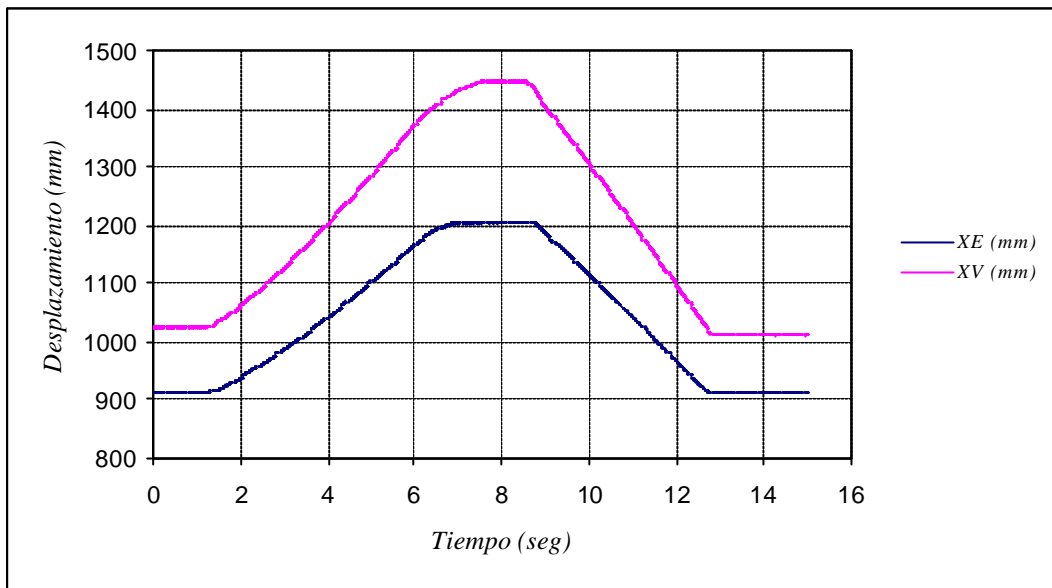


Figura 7.5 – Representación gráfica del desplazamiento de los cilindros oleohidráulicos para un ciclo de una subida y una bajada con carga

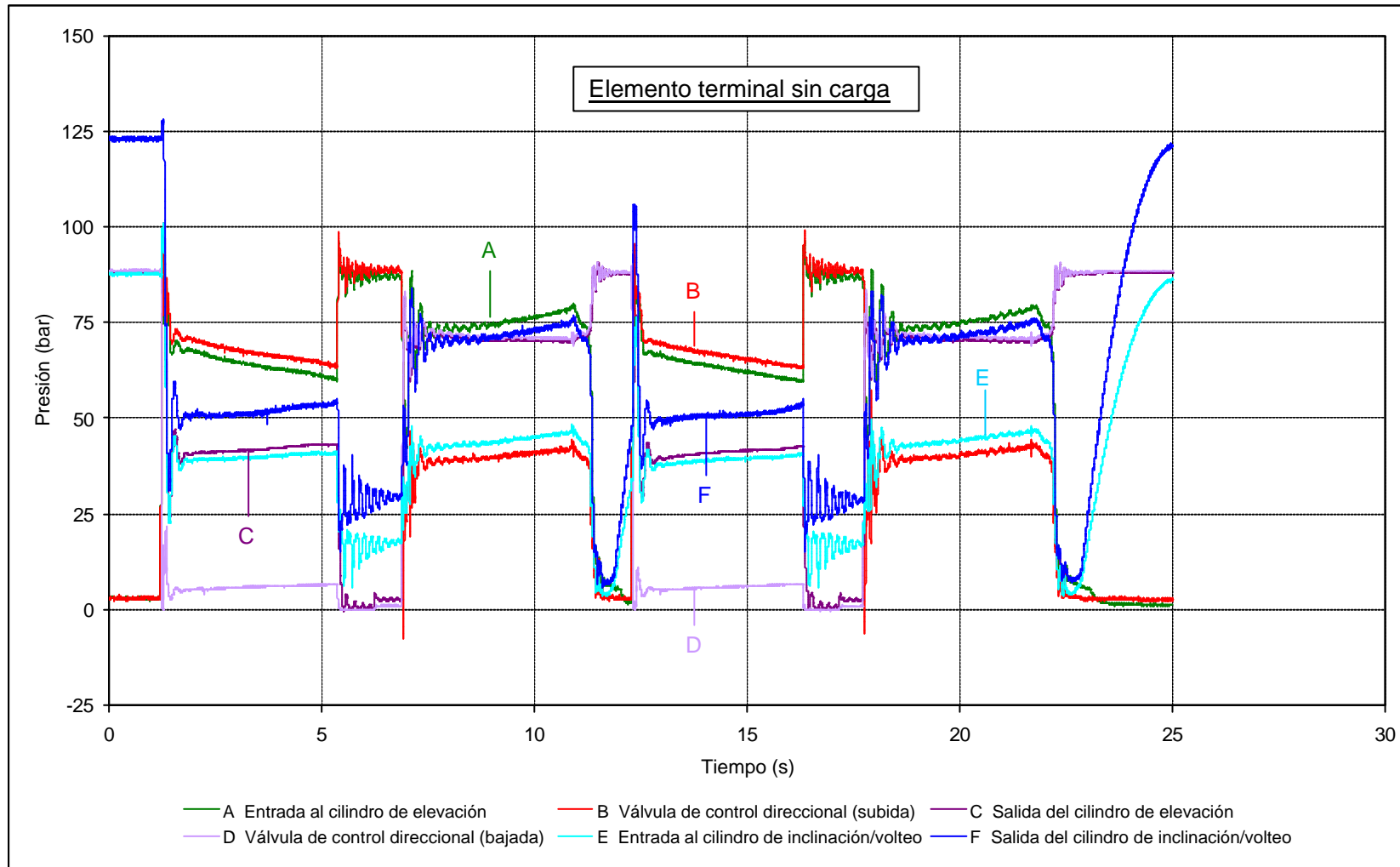


Figura 7.6 – Representación gráfica de las presiones dadas en el sistema oleohidráulico de sincronización para un mecanismo de elevación sin carga

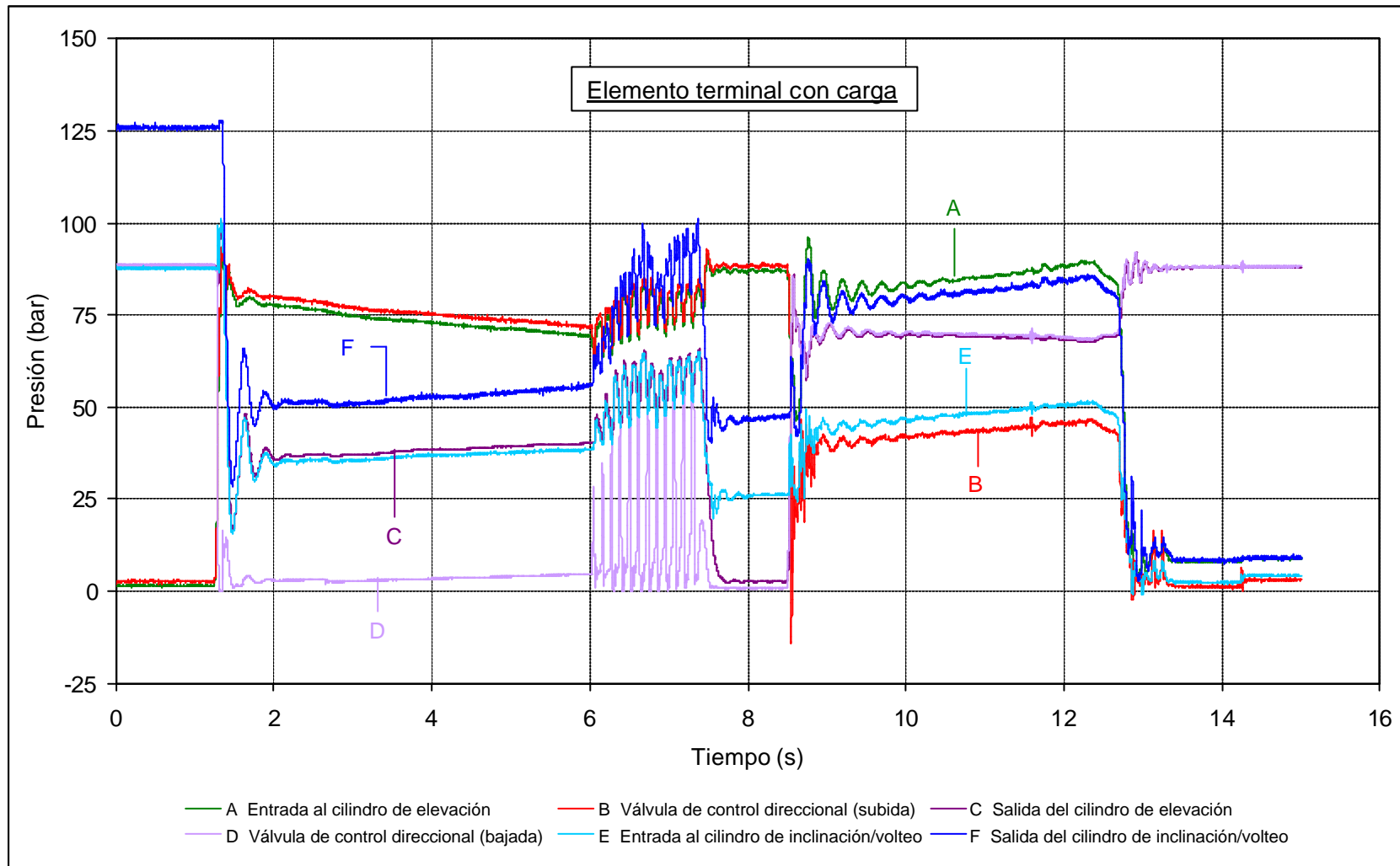


Figura 7.7 – Representación gráfica de las presiones dadas en el sistema oleohidráulico de sincronización para un mecanismo de elevación con carga

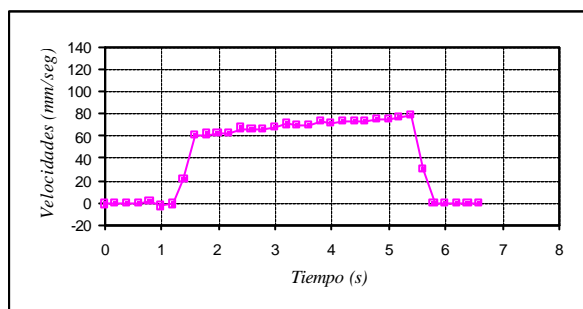


Figura 7.8 – Gráfica de la velocidad durante la subida del brazo y con el elemento terminal sin carga

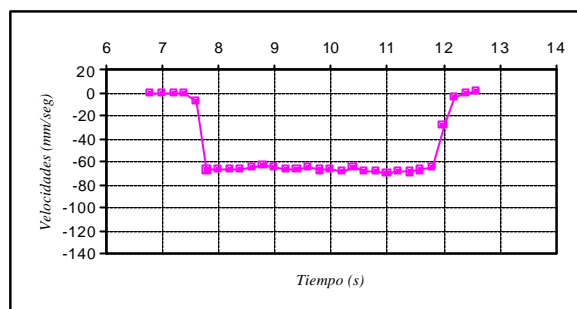


Figura 7.9 – Gráfica de la velocidad durante la bajada del brazo y con el elemento terminal sin carga

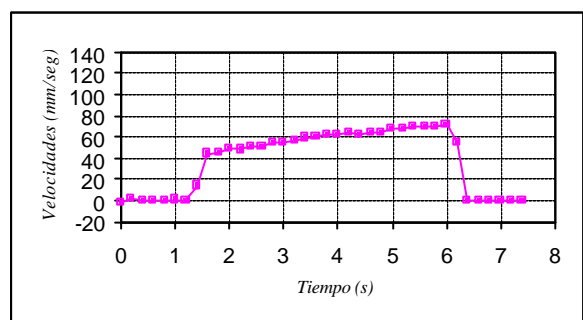


Figura 7.10 – Gráfica de la velocidad durante la subida del brazo y con el elemento terminal con carga

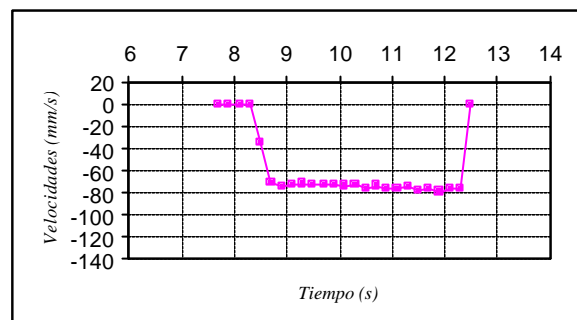


Figura 7.11 – Gráfica de la velocidad durante la bajada y con el elemento terminal con carga

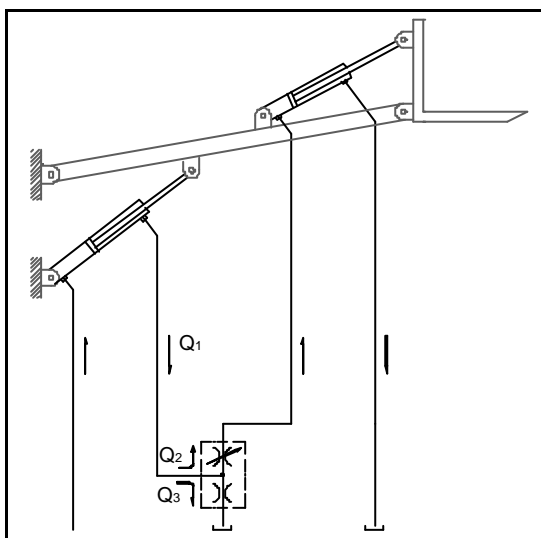


Figura 7.13a - Esquema de subida del mecanismo

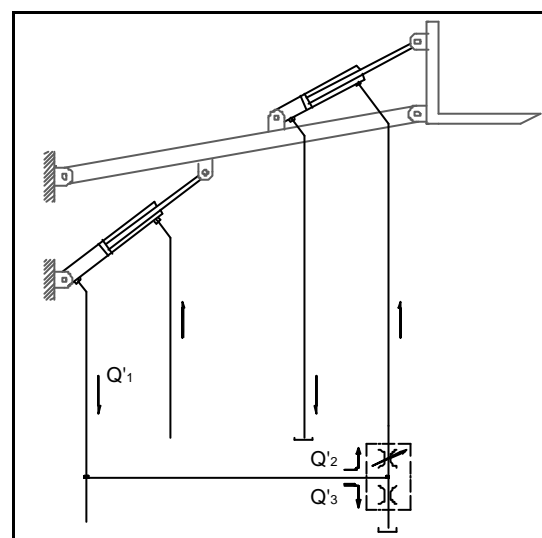


Figura 7.13b - Esquema de bajada del mecanismo

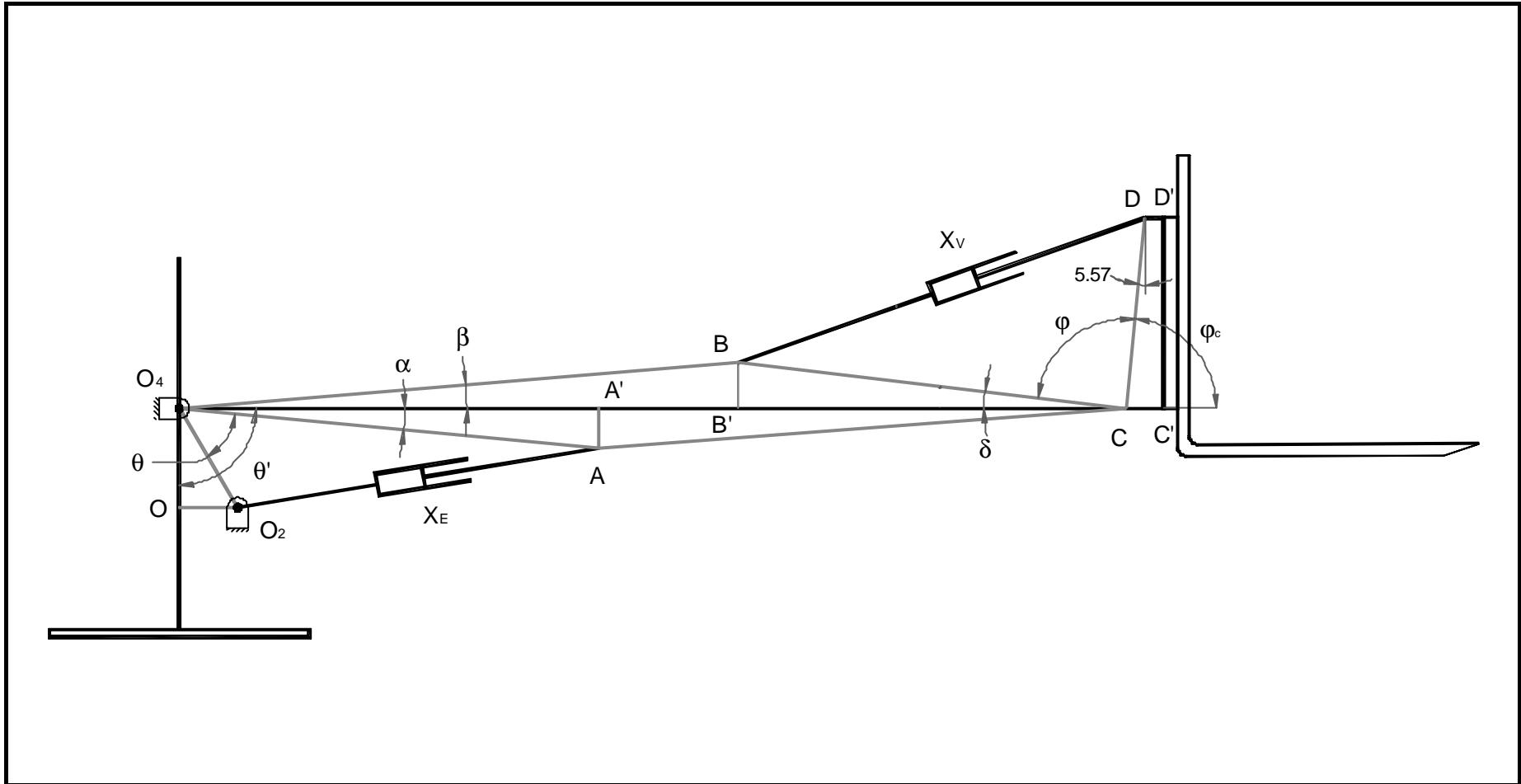


Figura 7.12 – Esquema cinemàtic del mecanisme base

7.4. Resultados experimentales

En la tabla 7.4 se resumen las ecuaciones de ajuste obtenidas sobre la base de los resultados experimentales (3 ensayos distintos) correspondientes a las siguientes variantes:

De la tabla 7.4 se define que:

ΔP_{SMB} – es la diferencia de presión correspondiente al conjunto mecanismo y sistema oleohidráulico de sincronización (bar)

ΔP_{VS} – es la diferencia de presión que corresponde a la caracterización de los elementos que configuran a la válvula de sincronización (bar)

Q – caudal (lts/min)

<i>Mecanismo base y sistema óleo hidráulico de sincronización</i>		
<i>Trayectoria</i>	<i>Nº de ensayo</i>	<i>Ecuación de ajuste</i>
<i>C ® E</i>	1	$\Delta P_{SMB} = 0.0148Q^{1.8464} + 1$
	2	$\Delta P_{SMB} = 0.0112Q^{2.0008} + 1$
	3	$\Delta P_{SMB} = 0.0111Q^{2.0003} + 0.892$
<i>A ® F</i>	1	$\Delta P_{SMB} = 0.0508Q^{2.0088} + 1.17$
	2	$\Delta P_{SMB} = 0.0533Q^{1.9986} + 1.17$
	3	$\Delta P_{SMB} = 0.0464Q^{2.0851} + 1.17$
<i>A ® B</i>	1	$\Delta P_{SMB} = 0.0279Q^{2.0021}$
	2	$\Delta P_{SMB} = 0.0505Q^{1.8084}$
	3	$\Delta P_{SMB} = 0.0505Q^{1.8675}$
		$\Delta P_{VS} = 0.027Q^{2.0027}$
<i>C ® D</i>	1	$\Delta P_{VS} = 0.0271Q^{2.0156}$
	2	
	3	

Tabla 7.4 – Ecuaciones de ajuste del conjunto mecanismo base y sistema oleohidráulico

En las figuras de la 7.14 a la 7.25, se muestra la comparación entre el comportamiento global del conjunto, formado por el mecanismo base y la válvula de sincronización y los modelos en los apartados anteriores. Cabe señalar que, por cada trayectoria hay tres ensayos distintos cuyas referencias *SMB (1)*, *SMB (2)* y *SMB (3)* y que son las representaciones gráficas, en todos los casos, a puntos capturados

en el ensayo realizado al conjunto compuesto por el mecanismo base y el sistema oleohidráulico de sincronización

Las representaciones gráficas de las figuras 7.14, 7.15 y 7.16 corresponden a los ensayos que permiten valorar el comportamiento de la válvula antirretorno J más el estrangulador de aguja derecho, las cuales se encuentran en la trayectoria de C → E. Mientras que las representaciones gráficas de las figuras 7.17, 7.18 y 7.19 corresponden a los ensayos que permiten valorar el comportamiento de la válvula antirretorno I más el estrangulador de aguja izquierdo, las cuales se encuentran en la trayectoria de A → F. Cabe recordar que, el estrangulador de aguja, es uno de los elementos que configuran la válvula divisora de caudal. A la derecha de los gráficos se encuentran las diferentes aperturas dadas, durante el ensayo de caracterización, al estrangulador de aguja, referenciadas con el color de sus respectivas curvas.

Las gráficas de las figuras 7.20, 7.21 y 7.22, representan el comportamiento del estrangulador fijo izquierdo ubicado en la trayectoria A → B. Es necesario señalar que, tanto el estrangulador fijo como el estrangulador de aguja son los estranguladores primarios que configuran a la válvula divisora de caudal. Las gráficas de las figuras 7.23, 7.24 y 7.25, representan el comportamiento del estrangulador fijo derecho, ubicado en la trayectoria de C → D, en el que se puede observar que los datos capturados en el ensayo del conjunto mecanismo base y sistema oleohidráulico de sincronización, son puntos que aproximadamente coinciden. Lo anterior, es debido a que la aguja estranguladora derecha en esta situación, está completamente abierta.

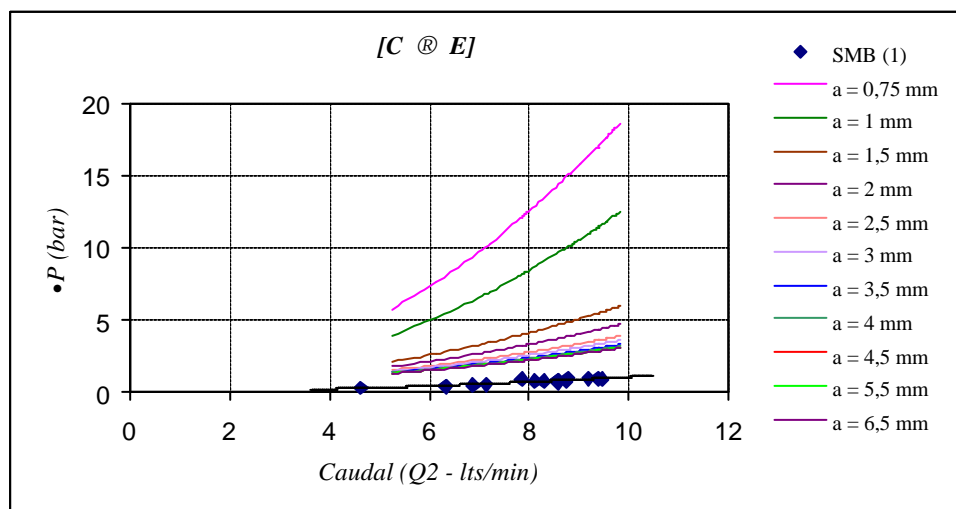


Figura 7.14 – Curvas características correspondiente al primer ensayo en la trayectoria C @ E

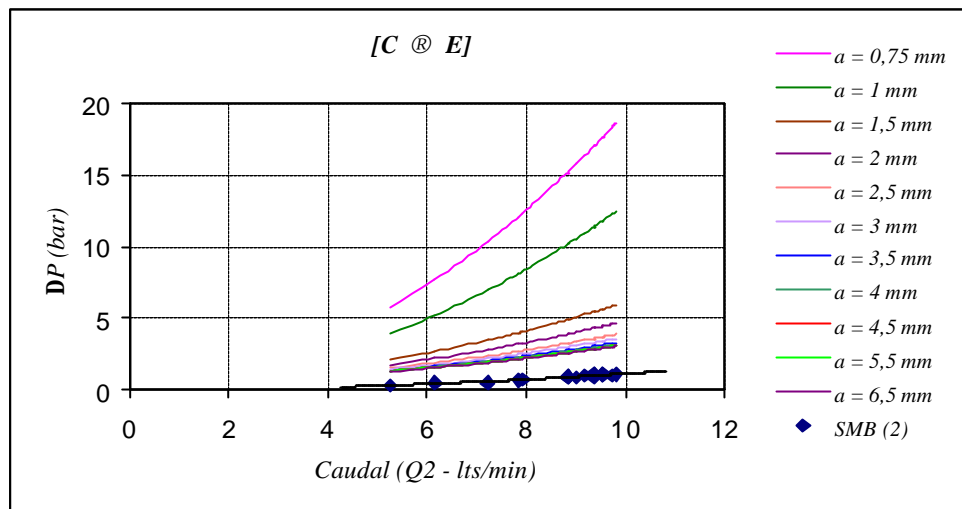


Figura 7.15 – Curvas características correspondiente al segundo ensayo en la trayectoria C @ E

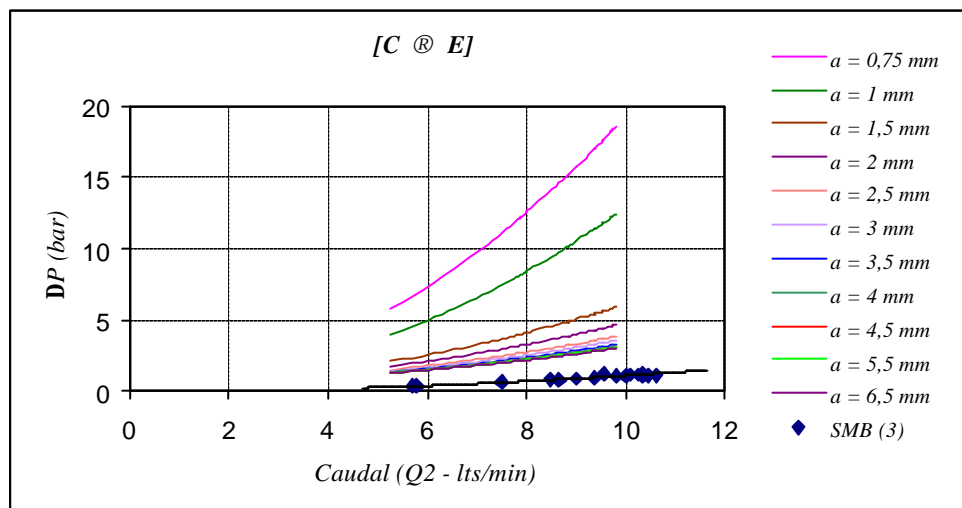


Figura 7.16 – Curvas características correspondiente al tercer ensayo en la trayectoria C @ E

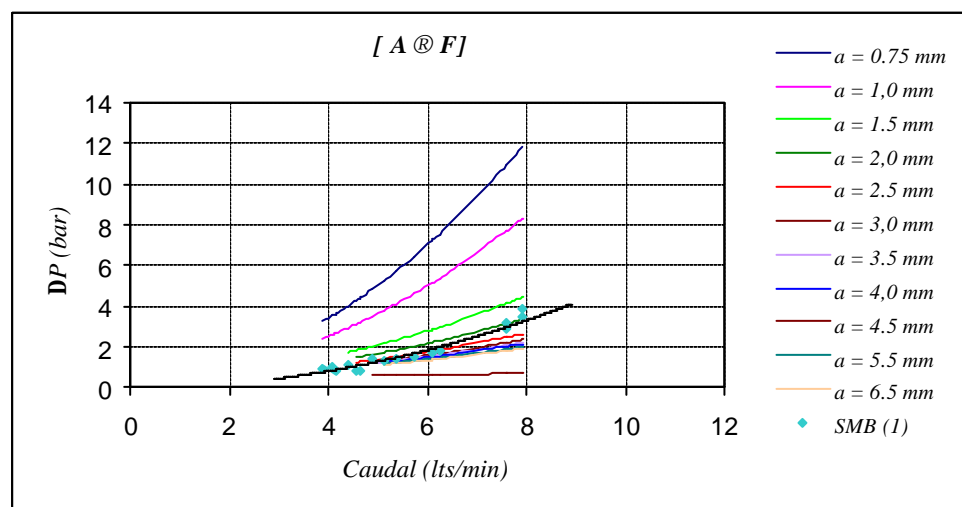


Figura 7.17 – Curvas características correspondiente al primer ensayo en la trayectoria A @ F

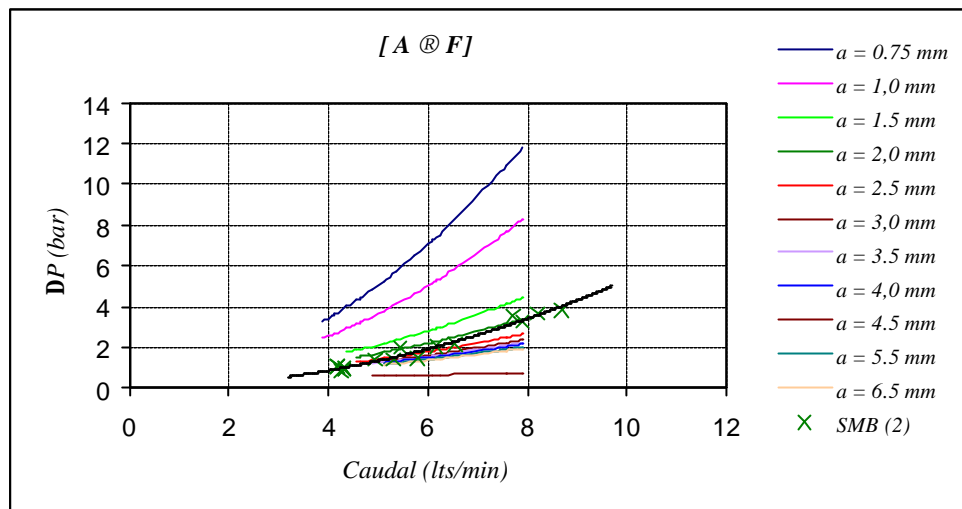


Figura 7.18 – Curvas características correspondiente al segundo ensayo en la trayectoria A @ F

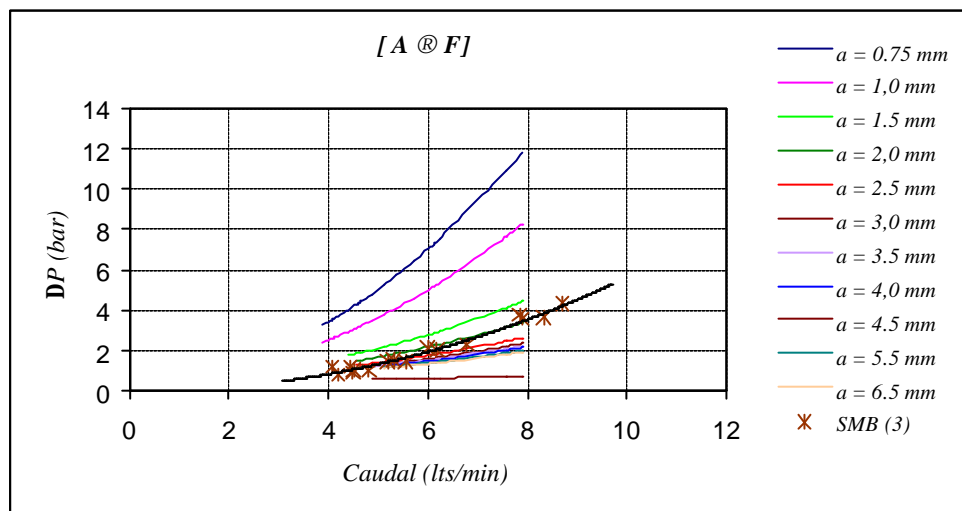


Figura 7.19 – Curvas características correspondiente al tercer ensayo en la trayectoria A @ F

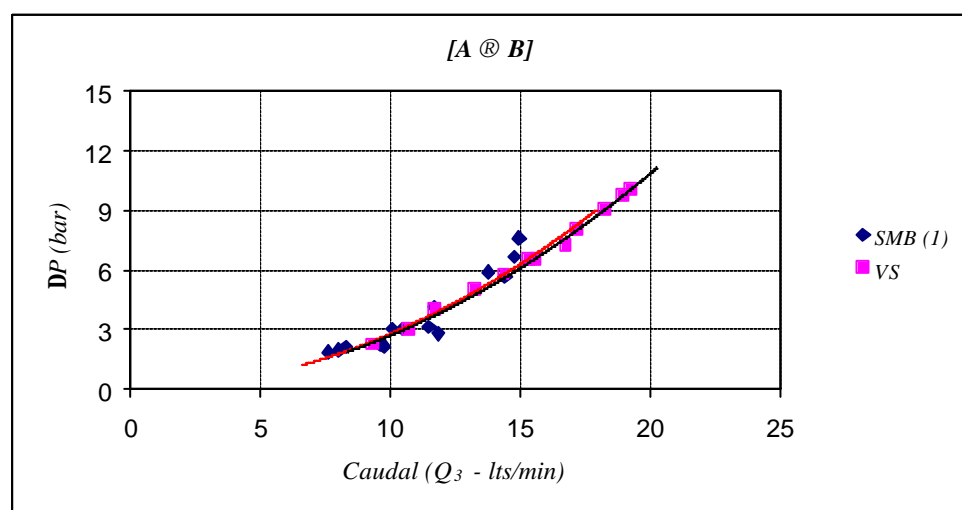


Figura 7.20 – Curva característica correspondiente al primer ensayo en la trayectoria de A @ B

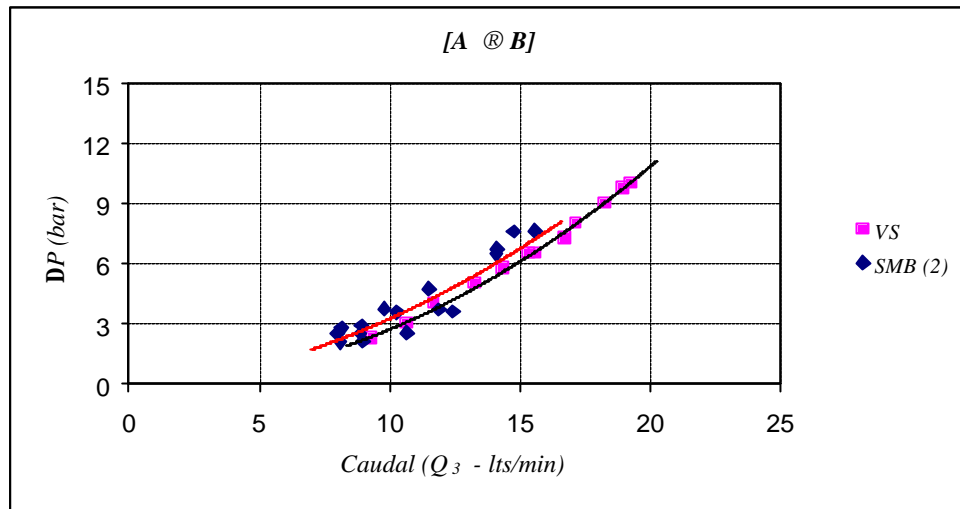


Figura 7.21 – Curva característica correspondiente al segundo ensayo en la trayectoria de A @ B

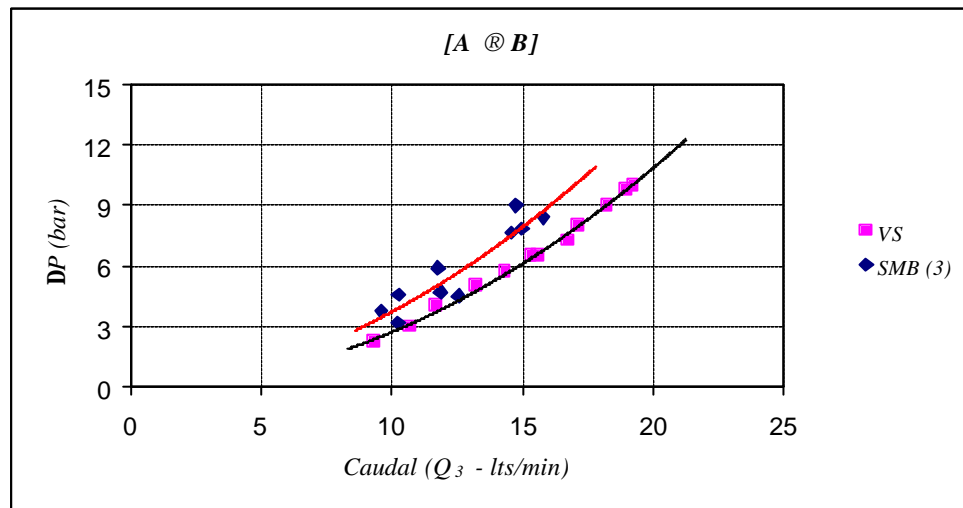


Figura 7.22 – Curva característica correspondiente al tercer ensayo en la trayectoria de A @ B

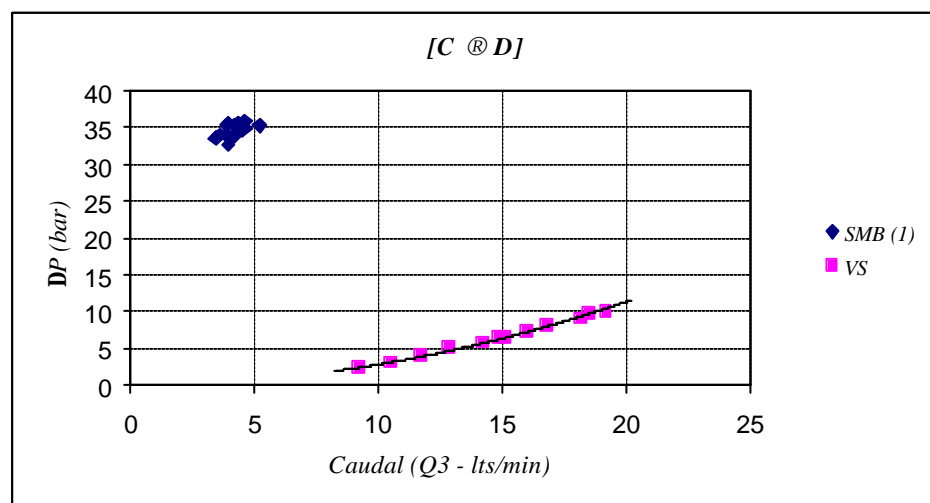


Figura 7.23 – Curvas características correspondiente al primer ensayo en la trayectoria C @ D

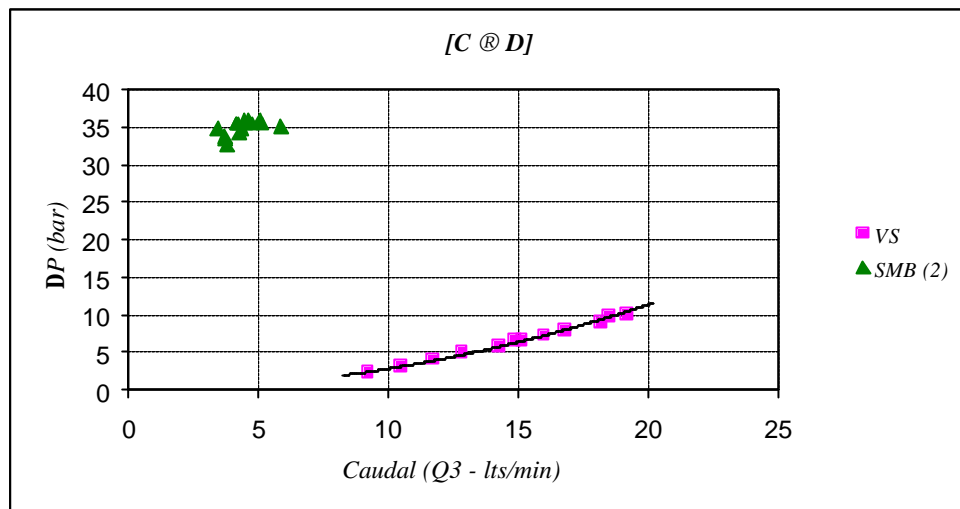


Figura 7.24 – Curvas características correspondiente al segundo ensayo en la trayectoria C @ D

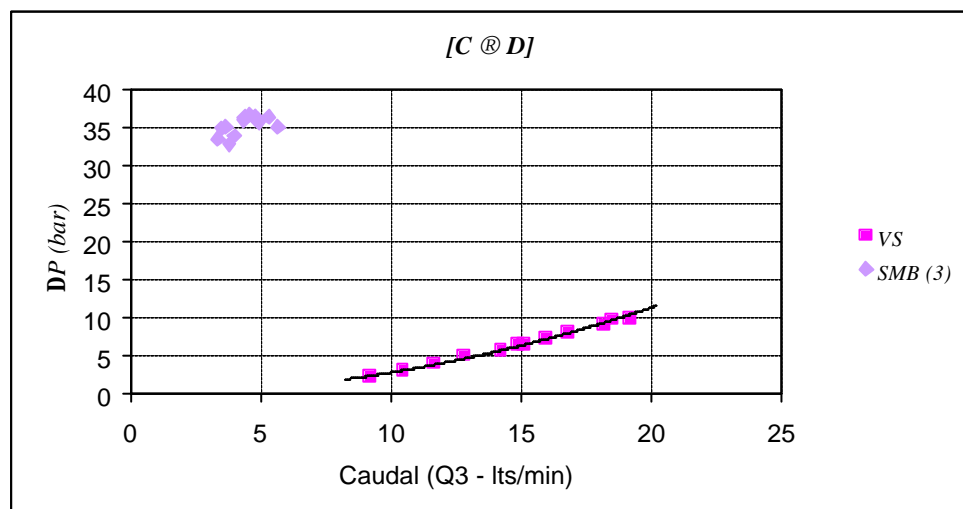


Figura 7.25 – Curvas características correspondiente al tercer ensayo en la trayectoria C @ D

En las figuras 7.26 y 7.27, se muestran dos ejemplos del comportamiento dinámico (inclinación o volteo) del elemento terminal, sin carga y con carga respectivamente, para unos parámetros de ajustes predeterminados, en particular, movimientos del 1 al 6 con la aguja estranguladora derecha completamente abierta y la izquierda a 1.20 mm.

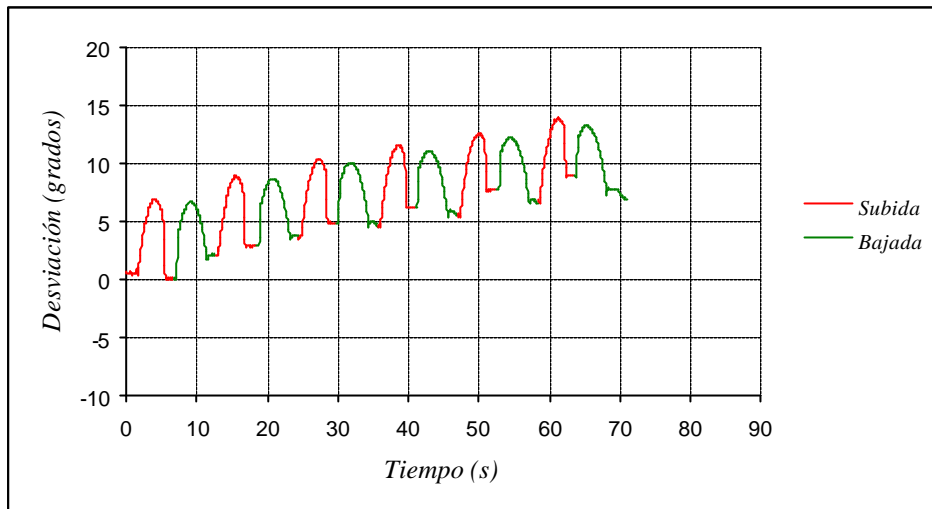


Figura 7.26 – Comportamiento del elemento terminal sin carga

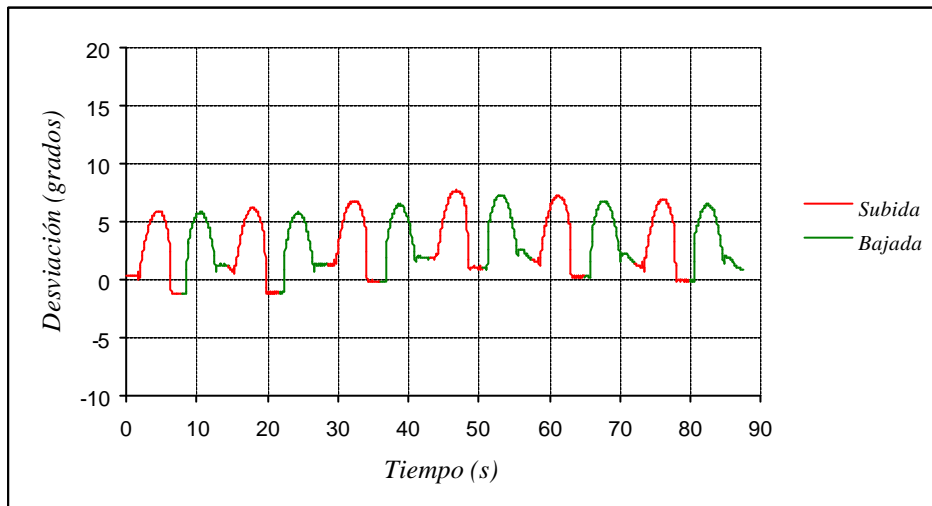


Figura 7.27 – Comportamiento del elemento terminal con carga

En la tabla 7.5 se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos

<i>Aguja Derecha (mm)</i>	<i>Aguja Izquierda (mm)</i>	<i>Desviac posición. Máxima (grados)</i>	<i>Desviac posición. Mínima (grados)</i>	<i>Aguja Derecha (mm)</i>	<i>Aguja Izquierda (mm)</i>	<i>Desviac posición máxima (grados)</i>	<i>Desviac posición mínima (grados)</i>
0	1,2	1	1	3	0,87	9	15
	1,25	-5	4		0,89	-5	4
	1,26	-6	-5		0,9	-15	-3
	1,28	-8	-6		0,92	-8	4
	1,3	-15	-10		0,97	-20	-7
0,5	1,18	-9	-5	3,5	0,8	2	14
	1,2	-5	-3		0,83	-17	-3
	1,22	-8	-5		0,85	-17	-1
	1,25	-12	-9		0,87	-11	4
	1,3	-12	-10		0,89	-27	-11
1	1	30	20	4	0,7	-15	16
	1,1	-5	-1		0,71	-15	4
	1,2	-11	-10		0,73	-15	4
	1,25	-15	-10		0,75	-17	2
	1,5	-20	-11		0,8	-34	-11
1,5	1,05	10	10	4,5	0,6	-2	20
	1,07	3	4		0,63	-10	14
	1,08	-7	-3		0,66	-30	-7
	1,09	-8	-3		0,67	-19	5
	1,1	-7	-5		0,7	-29	-5
2	1,05	-15	-5	5	0,5	0	29
	1,07	-9	-2		0,6	-32	-4
	1,09	-10	-4		0,75	-45	-11
	1,1	-10	-4				
	1,12	-20	-11				
2,5	0,96	-5	3				
	0,97	-8	0				
	0,98	-7	1				
	1	-8	1				
	1,08	-25	-12				

Tabla 7.5 – Tanteo en el sincronizado de los cilindros del mecanismo base a través del movimiento de los estranguladores de aguja

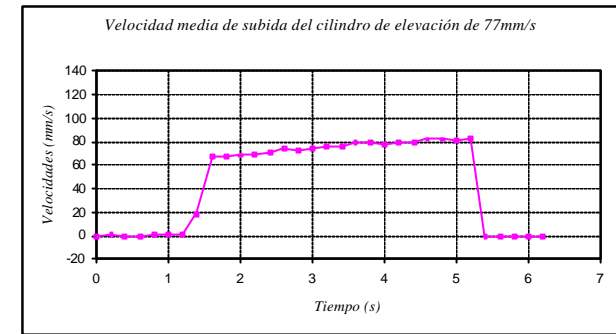
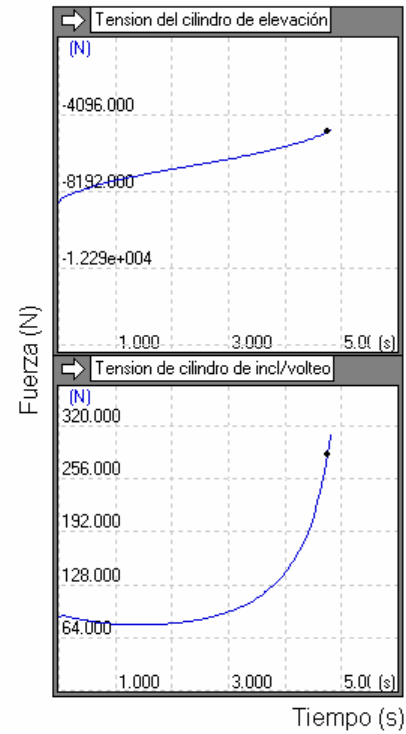
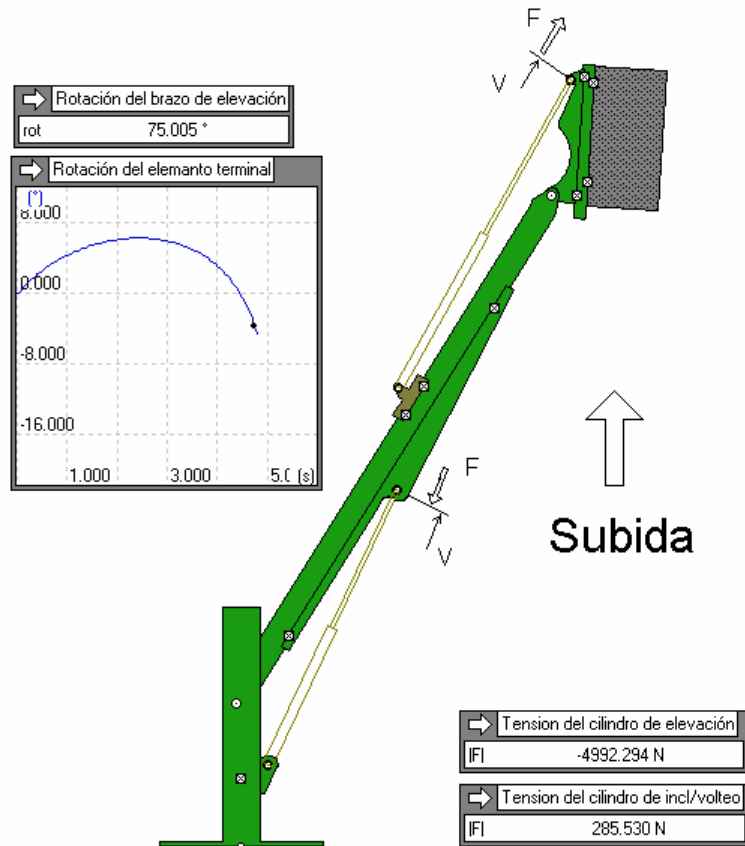
7.5. Análisis del perfil instantáneo de velocidades

En los perfiles de velocidades instantáneas de los movimientos de elevación e inclinación / volteo, se observa que la velocidad no se mantiene constante a un valor preajustado, sino que responde a la variación de la carga a que está sometido. Este análisis queda perfectamente justificado si comparamos los diagramas de fuerzas y velocidades instantáneas. A título de ejemplo, en las figuras 7.28, 7.29, 7.30, 7.31, se constata que, cuando la carga es resistiva y aumenta como consecuencia del tipo de mecanismo, la velocidad instantánea disminuye (caso de movimiento en la subida del mecanismo o el movimiento de inclinación / volteo en la bajada). Paralelamente, cuando la carga es de embalamiento y aumenta como consecuencia del movimiento del mecanismo, la velocidad disminuye (caso del movimiento en la bajada del mecanismo y movimiento de inclinación / volteo en la subida del mecanismo).

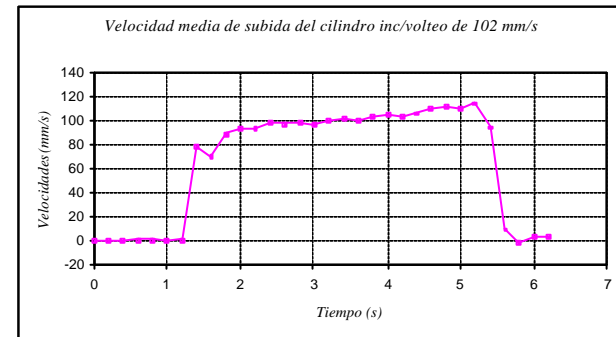
Estas variaciones no son debidas a errores de división del conjunto de sincronización, sino al comportamiento de un sistema oleohidráulico que se enfrenta a un sistema mecánico con carga variable.

La variación de la carga queda ilustrada en los resultados obtenidos por simulación y mostrados en las figuras 7.28, 7.29, 7.30 y 7.31

También cabe destacar que en el perfil de velocidades instantánea correspondientes al de inclinación / volteo, se manifiesta un pico de velocidad que se corresponde a un pico de velocidad máxima que tiene su origen en el comportamiento dinámico de la válvula de frenado en la transición de bloqueo al desbloqueo.



(a)



(b)

Figura 7 28 Mecanismo base a velocidad media de subida de 77 mm/s

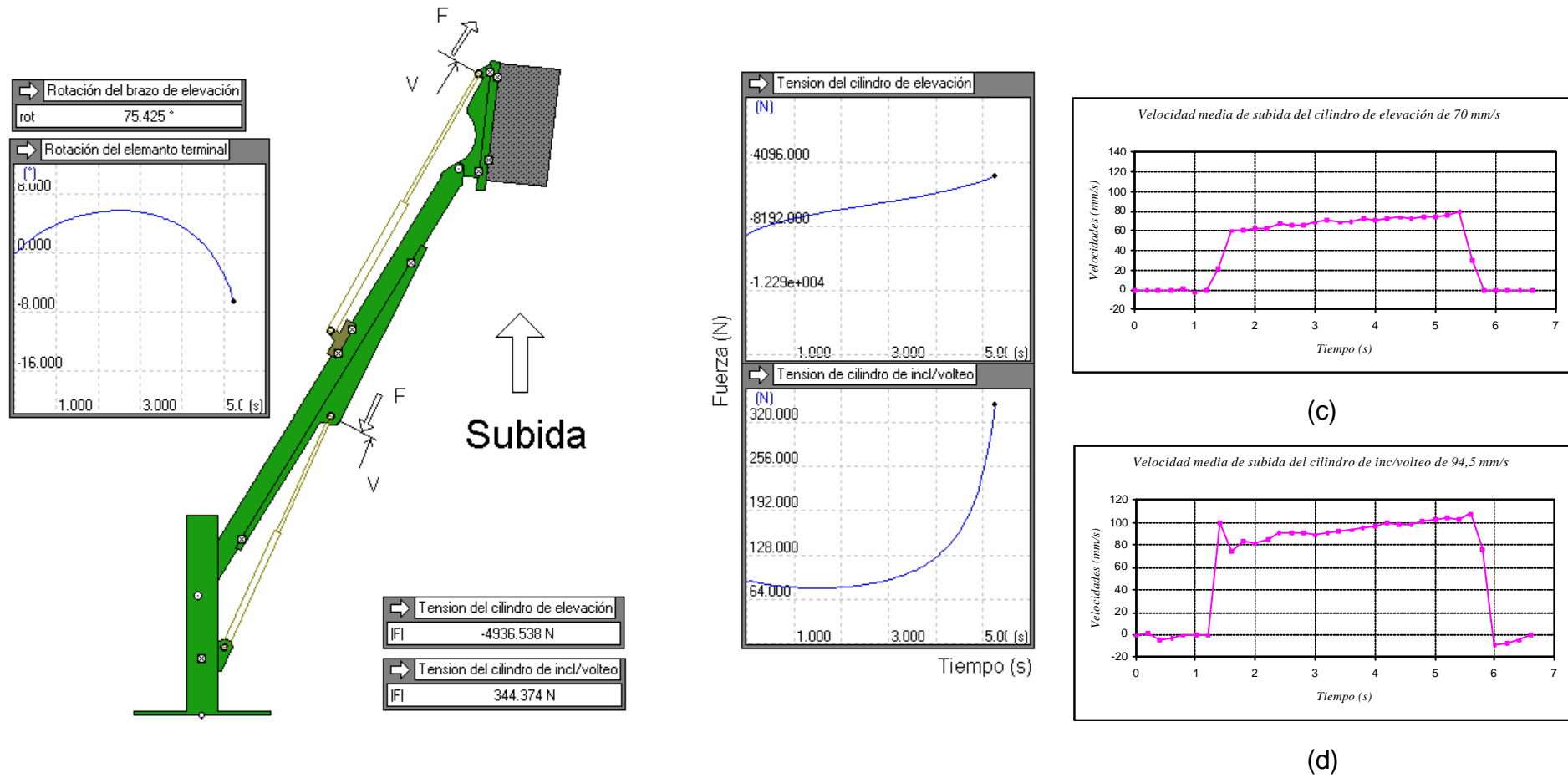
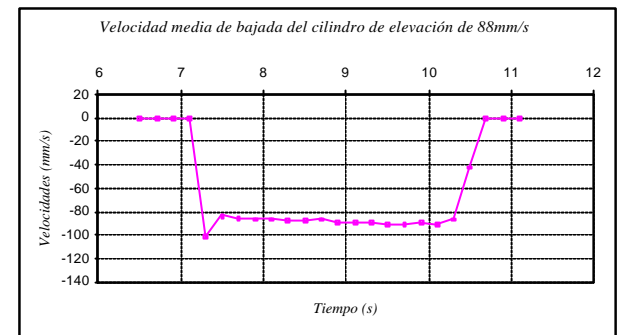
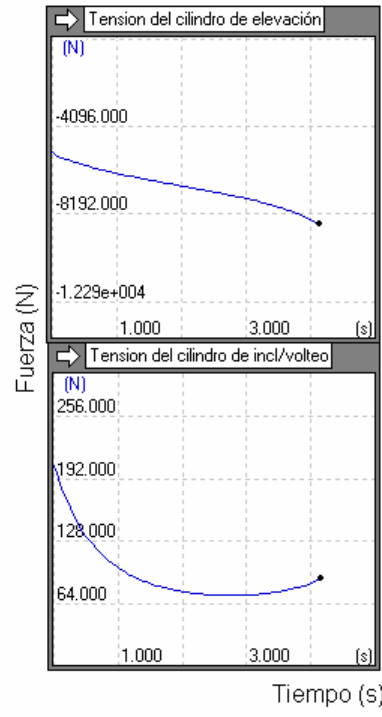
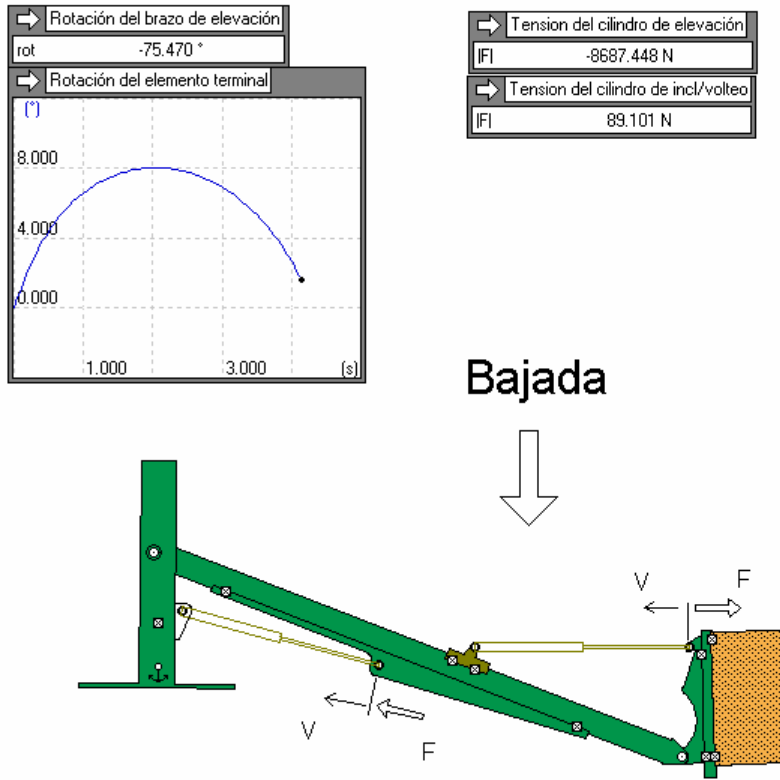
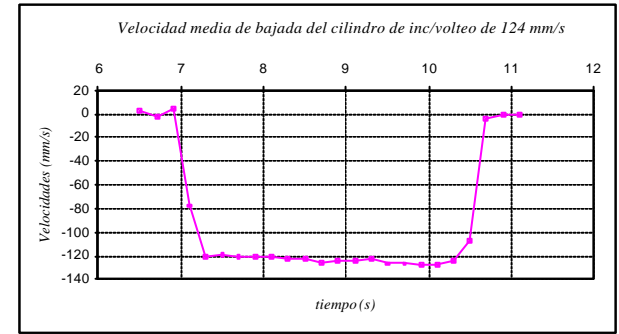


Figura 7.29 Mecanismo base a velocidad media de subida de 70 mm/s

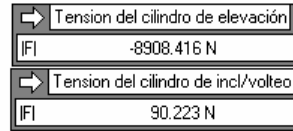
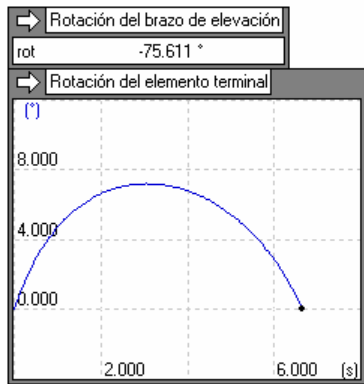


(a)

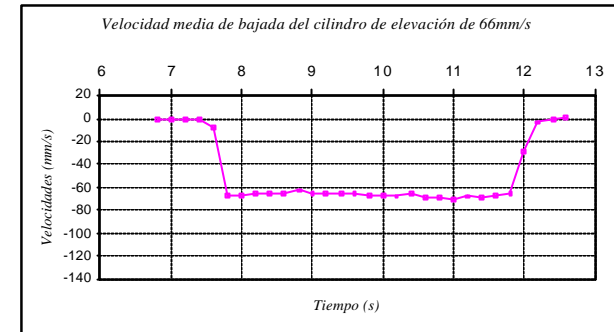
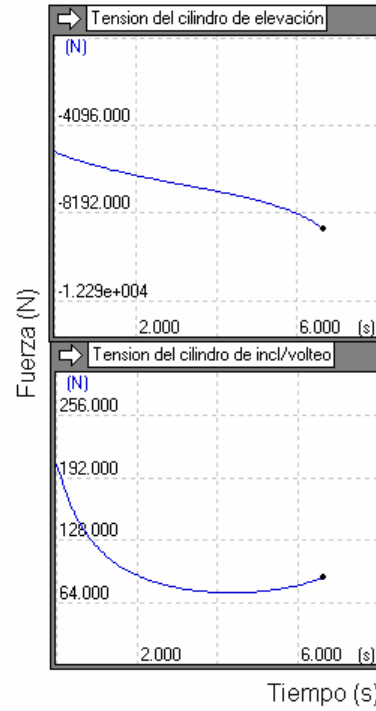
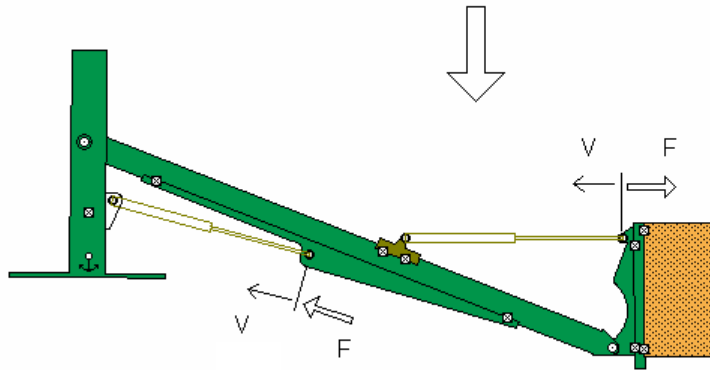


(b)

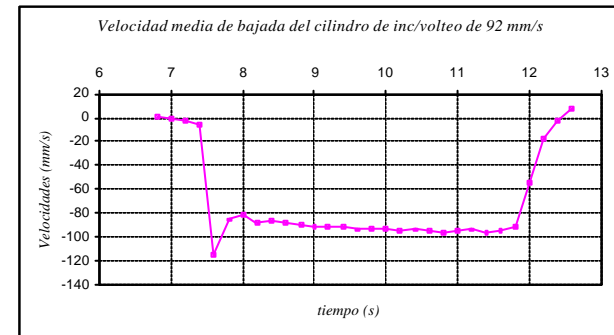
Figura 7.30 - Mecanismo base a velocidad media de bajada de 88 mm/s



Bajada



(c)



(d)

Figura 7.31 - Mecanismo base a velocidad media de bajada de 66 mm/s

7.6. Análisis crítico de los resultados experimentales

A la vista de los resultados experimentales obtenidos en las distintas series de los ensayos realizados con diferentes condiciones de trabajo, cabe mencionar que:

1. El comportamiento real del prototipo de la válvula de sincronización ensayada, ha permitido confirmar los modelos teóricos desarrollados de cada uno de los componentes que la integran.
2. En su conjunto, la válvula manifiesta unas prestaciones notables tal y como puede observarse en la figura 7.32
3. En determinadas condiciones de regulación y carga, el sistema manifiesta ciertas irregularidades que serán objeto de análisis en el siguiente apartado.

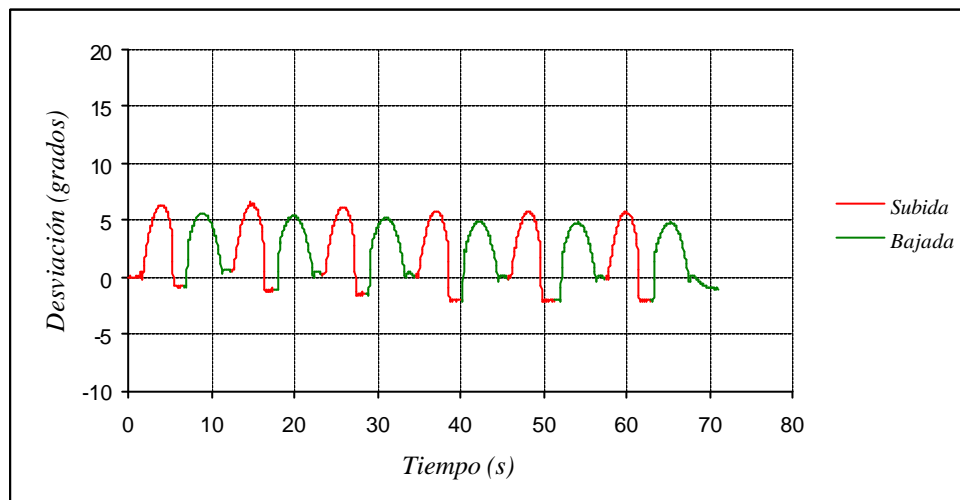


Figura 7.32 – Representación gráfica del comportamiento del elemento terminal durante la subida y bajada del brazo

7.6.1. Análisis de las limitaciones detectadas

En general, la válvula de sincronización actúa correctamente, pero no puede compensar la no-linealidad de comportamiento que impone la geometría del mecanismo.

En la figura 7.33 se muestra un movimiento angular del elemento terminal a lo largo de la trayectoria de subida entre el punto muerto inferior y el punto muerto superior. El acuerdo entre los resultados experimentales y los resultados de la simulación es notable.

Esta limitación debida a la desviación angular (no linealidad) ya era esperada, habida cuenta que la válvula de sincronización sólo permite ajustar un valor constante de la relación de velocidades constante.

La posible incorporación de componentes, de control proporcional de caudal en las válvulas divisoras de caudal, permitiría superar esta limitación.

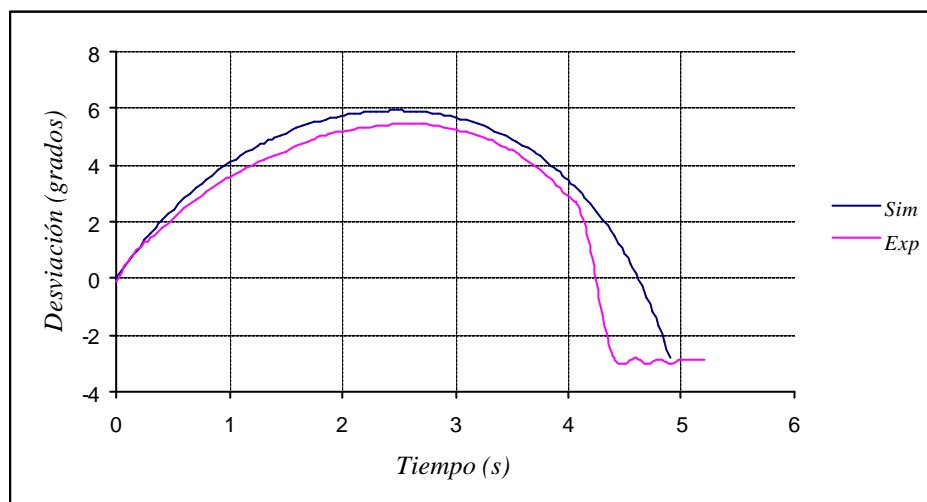


Figura 7.33 – Comparación entre el movimiento angular del elemento terminal simulado y el experimental

Además de la desviación angular, en las gráficas de las figuras 7.34a a la 7.34d, se pueden observar otras irregularidades en el sincronizado del movimiento de elevación y en el movimiento de inclinación / volteo.

Se observa que el sistema es muy sensible a los ajustes de las válvulas divisoras de caudal, válvulas de frenado y a las perturbaciones exteriores debido a la carga. También se observa una acusada diferencia de comportamiento entre los movimientos de subida y bajada. Estas diferencias son acumulativas, y como

consecuencia, el sistema después de haber sido accionado durante un elevado número de ciclos, pierde su capacidad de sincronización.

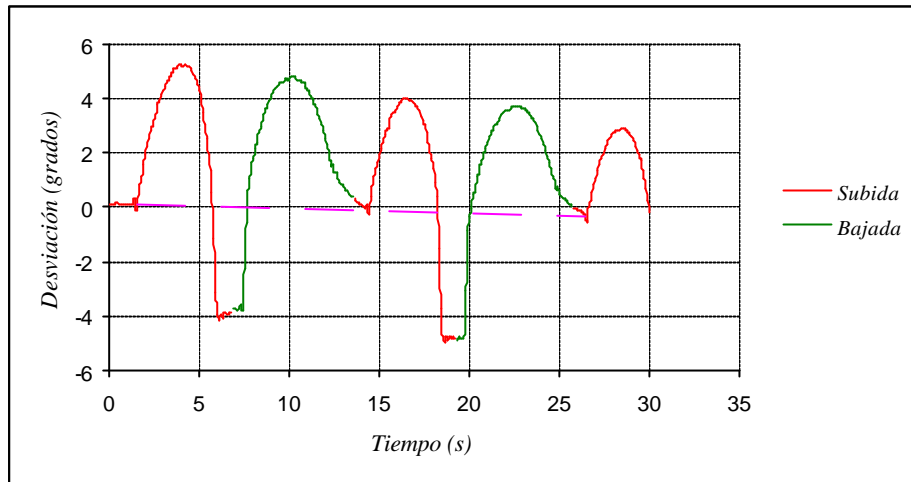


Figura 7.34a- Comportamiento gráfico del elemento terminal a una velocidad de elevación de 77.6mm/s

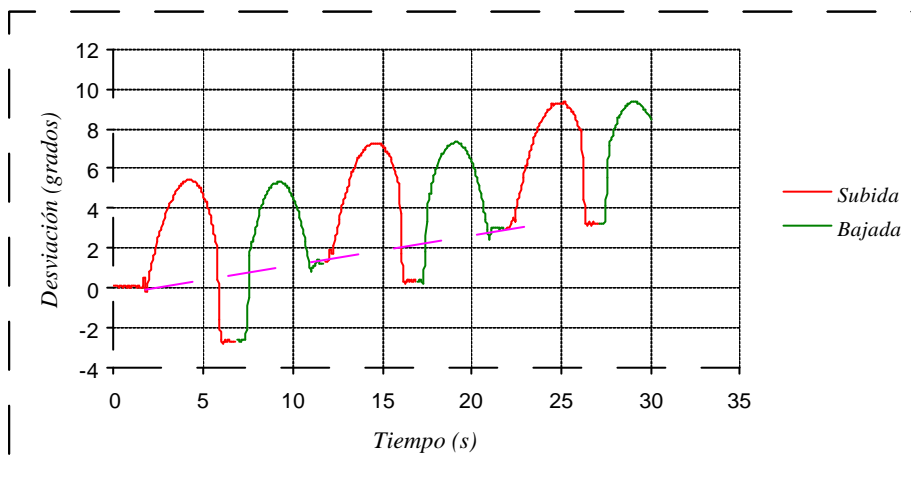


Figura 7.34b - Comportamiento gráfico del elemento terminal a una velocidad de elevación de 72.7mm/s

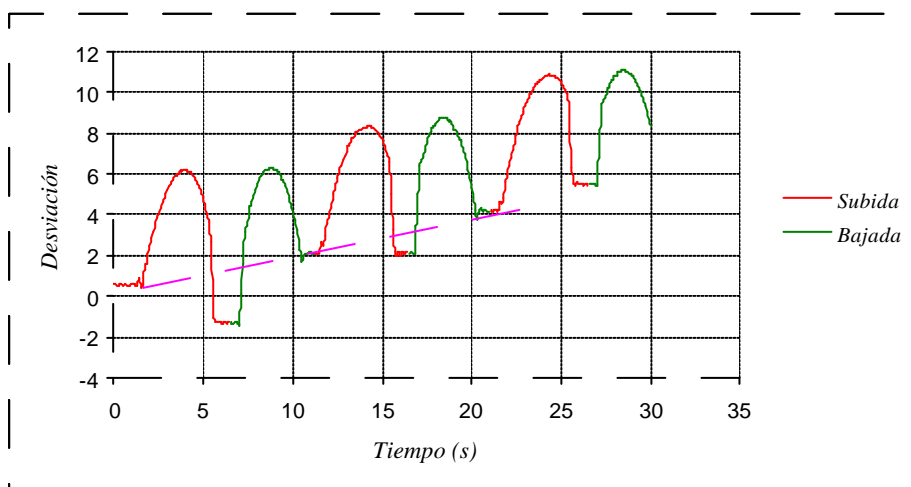


Figura 7.34c - Comportamiento gráfico del elemento terminal a una velocidad de elevación de 70.2mm/s

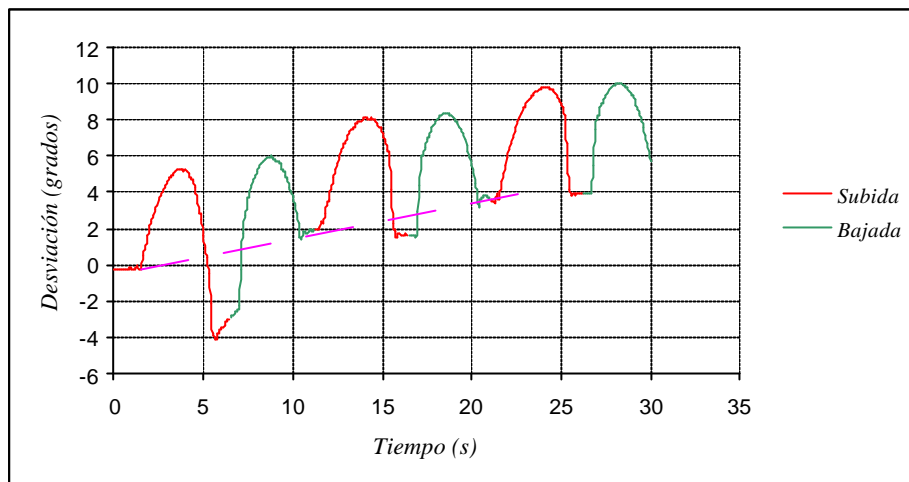


Figura 7.34d - Comportamiento gráfico del elemento terminal a una velocidad de elevación de 70mm/s

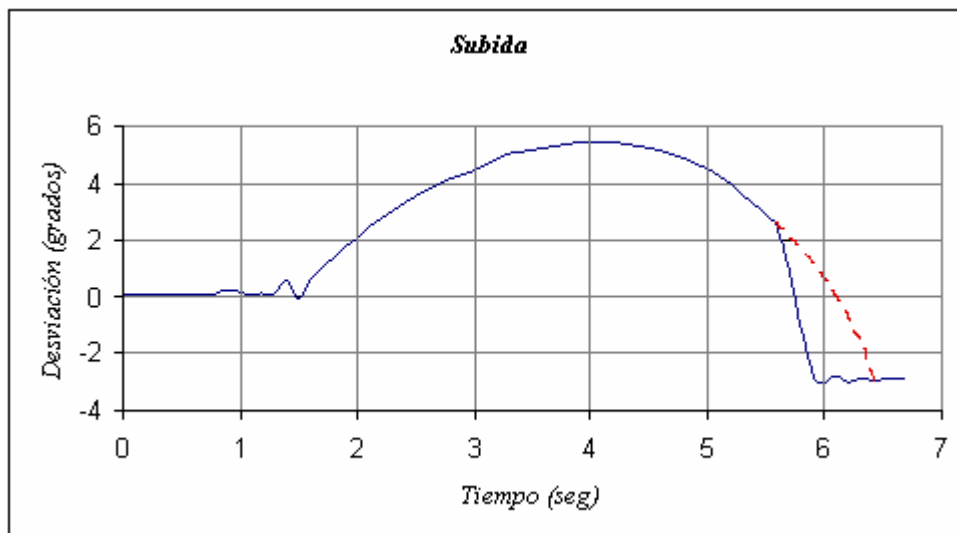


Figura 7.35 – Representación gráfica que muestra el descontrol del cilindro de inclinación / volteo en subida

Analizando independientemente los movimientos de subida y bajada del sistema actuando en modo de “sincronizado”, se constatan tres comportamientos anómalos:

1. Sincronización inadecuada y no satisfactoria de los movimientos de elevación y el de inclinación / volteo. Se puede solventar este problema optimizando el dimensionado del sistema real. Las secciones efectivas del cilindro de elevación lado vástago y las del cilindro de inclinación / volteo lado pistón no se corresponden con las secciones efectivas de los estranguladores de la válvula divisora responsable del sincronizado durante la subida del sistema.

2. Respuesta lenta del sistema de bloqueo del movimiento de inclinación / volteo. Cuando el sistema de elevación base llega a una determinada posición más elevada y la válvula divisora deja de actuar, se observa que durante un pequeño intervalo de tiempo, el cilindro de inclinación / volteo queda descontrolado a merced de las perturbaciones externa de la carga. Como consecuencia, se produce un pequeño descenso de la carga que se manifiesta en forma de un error del sincronizado de 2 a 5 grados. En la figura 7.35 se muestra de forma evidente este descontrol durante la subida y en el de la figura 7.36 durante la bajada.
3. Se observa que la sincronización de ambos movimientos es muy sensible al ajuste de la válvula divisora de caudal responsable de la bajada. En la figura 7.36 se muestra de forma evidente este desfase, en general, mucho más acusado en el movimiento de bajada.

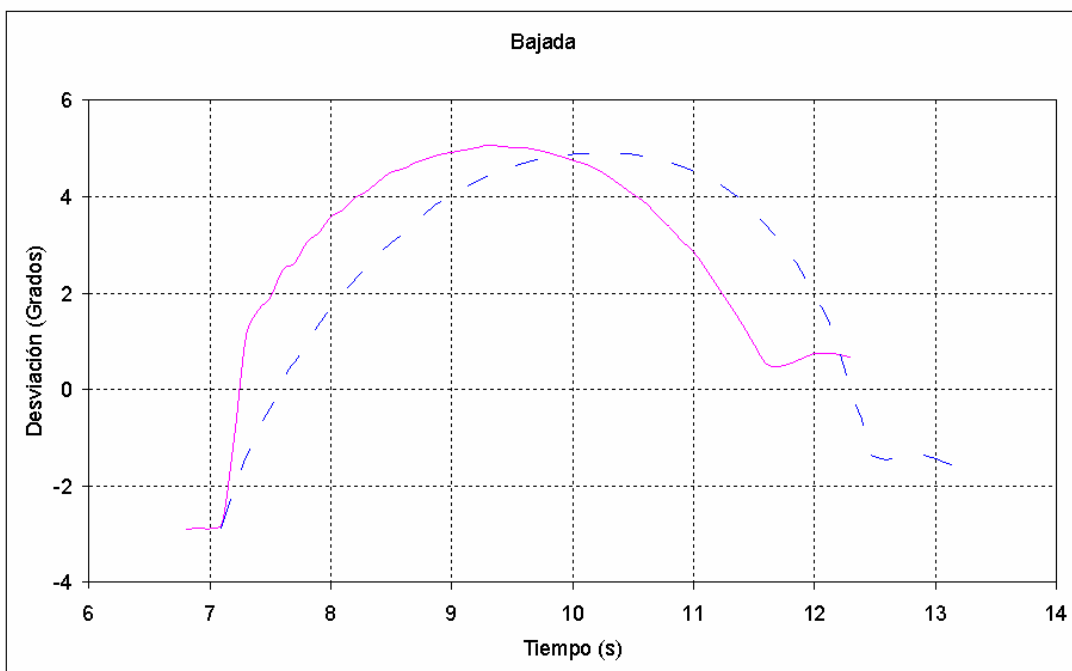


Figura 7.36 – Representación gráfica que muestra el bloqueo que se da en el cilindro de inclinación / volteo en bajada

En las figuras 7.37 y 7.38 se muestra el comportamiento de la válvula sincronizadora, para condiciones de regulación y carga que ponen en evidencia la presencia simultánea de los comportamientos anómalos descritos

Si se parte de la base de que somos capaces de ajustar los estranguladores de aguja de los divisores de caudal, nos daremos cuenta que el comportamiento del

conjunto se ve influenciado por la carga, no sólo por la influencia que tiene sobre los estranguladores de aguja, sino por la influencia que la carga tiene sobre las válvulas de frenado (válvulas reguladoras de presión). Cuando la carga es pequeña, se observa que, cuando el mecanismo base está arriba, se produce un descontrol de la carga, lo cual se manifiesta por medio de un bloque / instantáneo. La causa hay que buscarla en el tiempo de respuesta de la válvula de frenado o en el comportamiento de esta válvula a pequeños umbrales en las vías de entrada y salida de pilotaje.

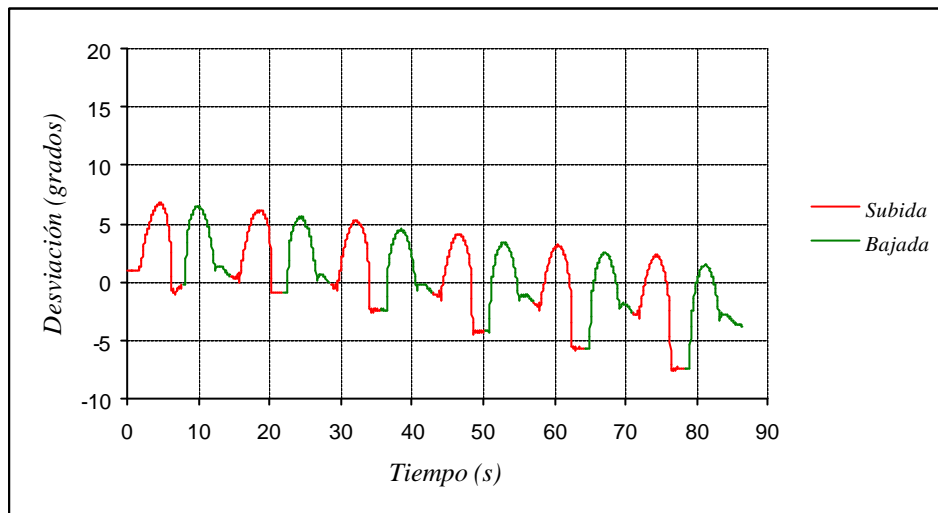


Figura 7.37 – Comportamiento de la válvula de sincronización para un elemento terminal con carga, con el estrangulador de aguja derecho totalmente abierto y el izquierdo a 1.18mm

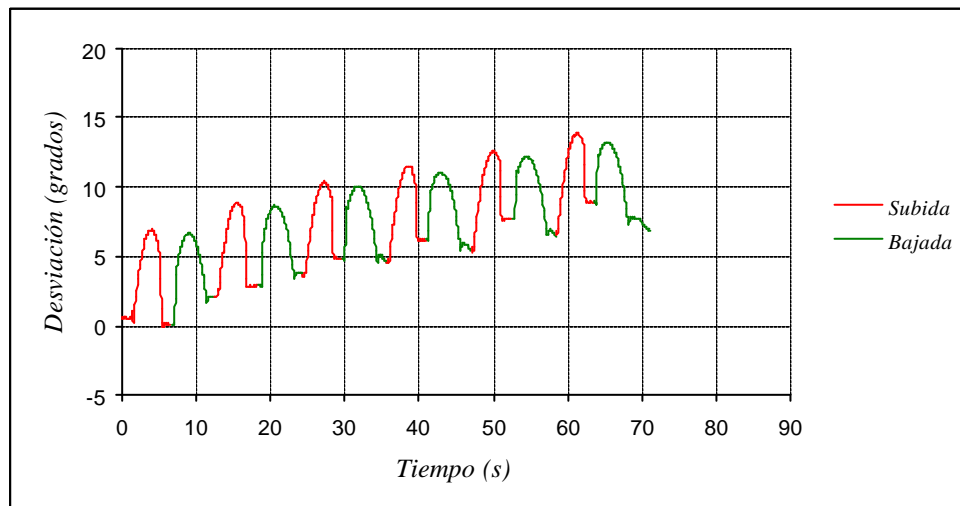


Figura 7.38 - Comportamiento de la válvula de sincronización para un elemento terminal sin carga, con el estrangulador de aguja derecho totalmente abierto y el izquierdo a 1.20mm

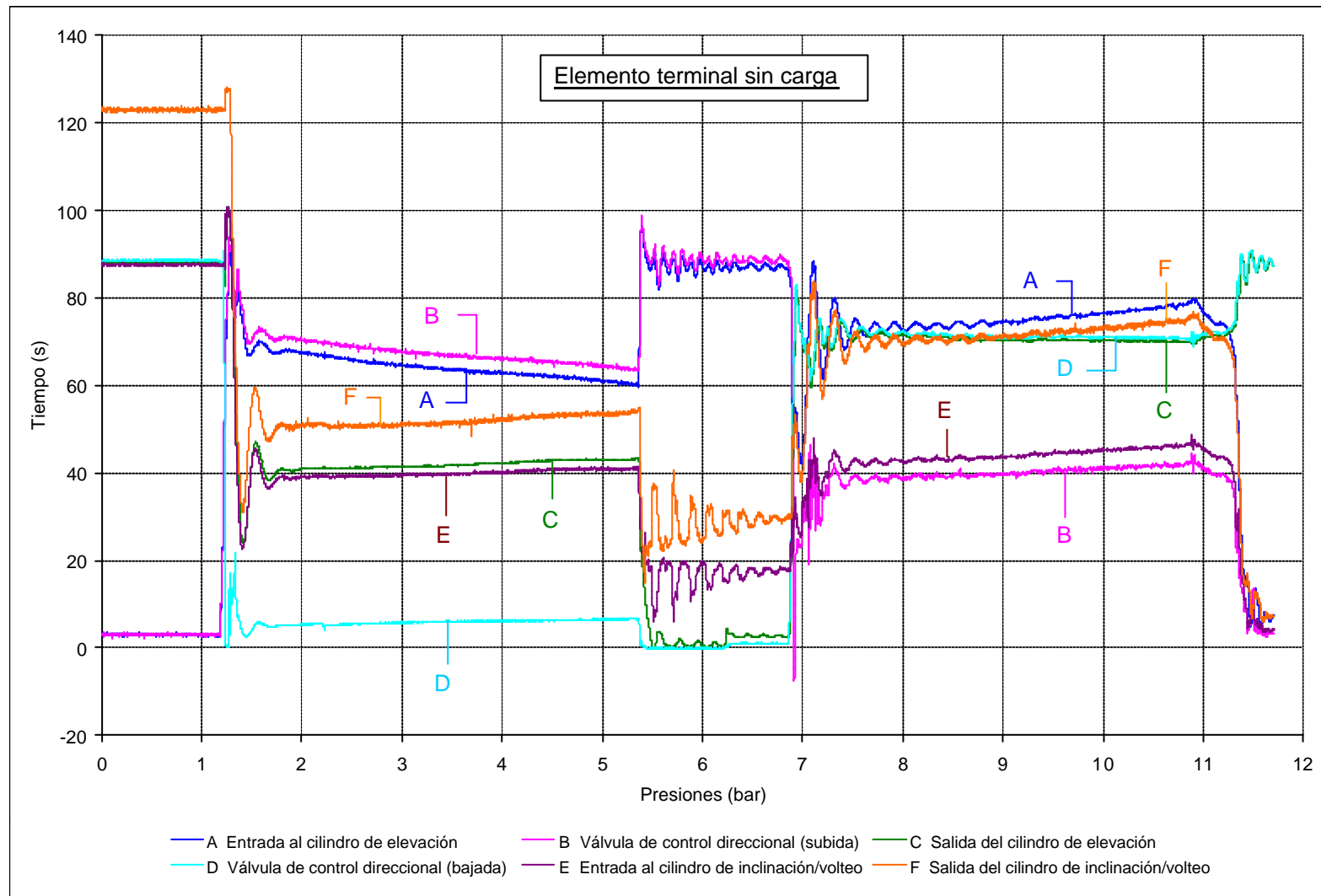


Figura 7.39 – Representación gráfica de las presiones dadas en el sistema oleohidráulico de sincronización para un mecanismo de elevación sin carga

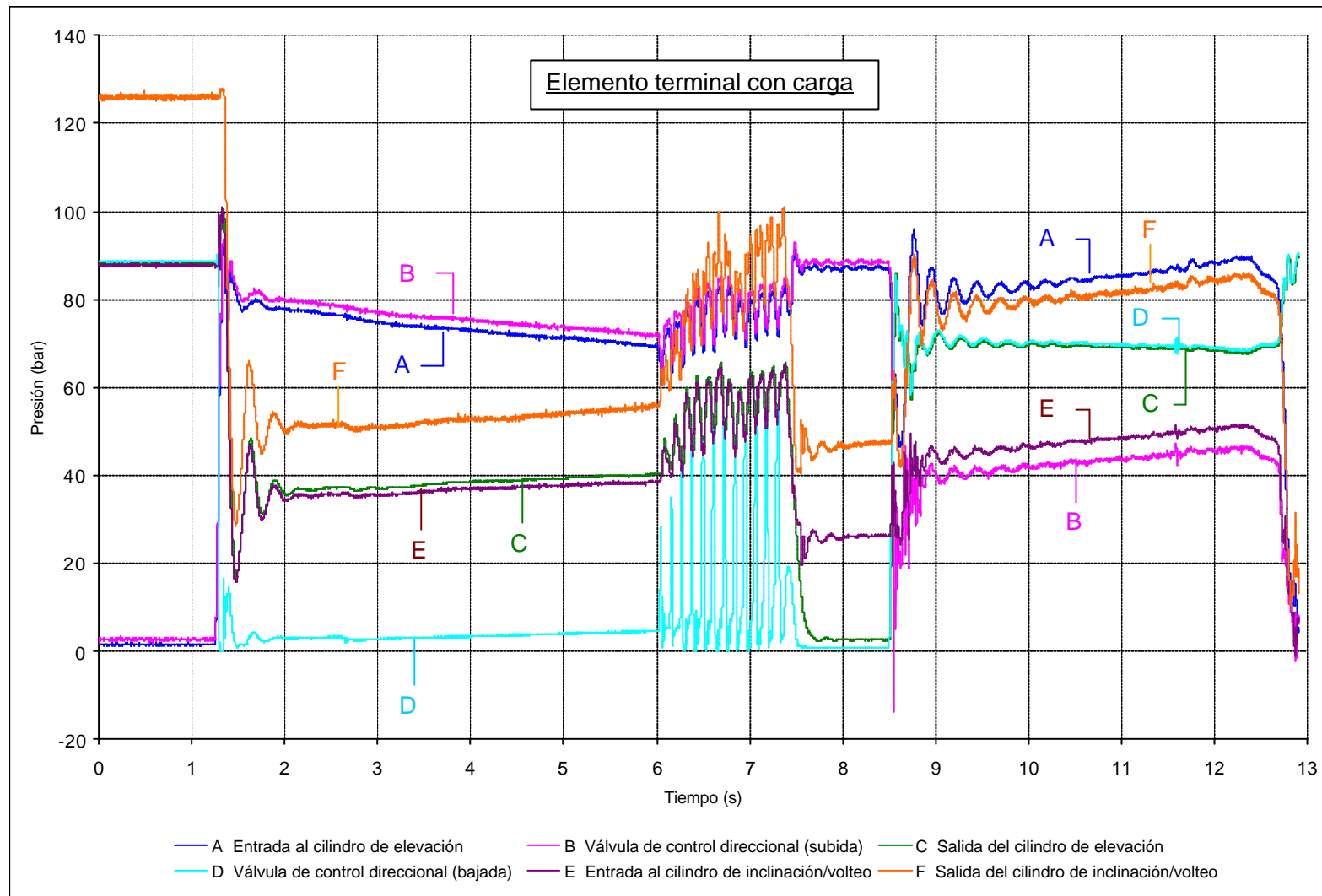


Figura 7.40 – Representación gráfica de las presiones dadas en el sistema oleohidráulico de sincronización para un mecanismo de elevación con carga

7.6.2. Análisis de la sincronización del mecanismo base y el elemento terminal

A lo largo de las pruebas experimentales realizadas para valorar la bondad del sistema de sincronización analizado, cabe destacar una serie de pruebas sistemáticas que nos permiten analizar como varía la sincronización en función del tiempo. En la figura 7.39 y 7.40 se han graficado las evoluciones de las presiones en ciclo completo para dos situaciones de carga diferentes. En el anexo E se complementan esta información con otras gráficas obtenidas en estas pruebas.

En las figuras 7.41 y 7.42 se muestran las velocidades media de los movimientos de elevación y de inclinación / volteo obtenidas en algunas pruebas experimentales.

En un primer análisis rápido, los resultados son coherentes, sin embargo, tal y como se muestran en las figuras 7.41 y 7.42, se observa que esta relación de sincronizado varía ligeramente al aumentar la velocidad media del movimiento de elevación en el siguiente sentido: en el movimiento de subida, la relación de velocidad de sincronizado disminuye (figura 7.43), en el movimiento de bajada, la relación de sincronizado aumenta (figura 7.44).

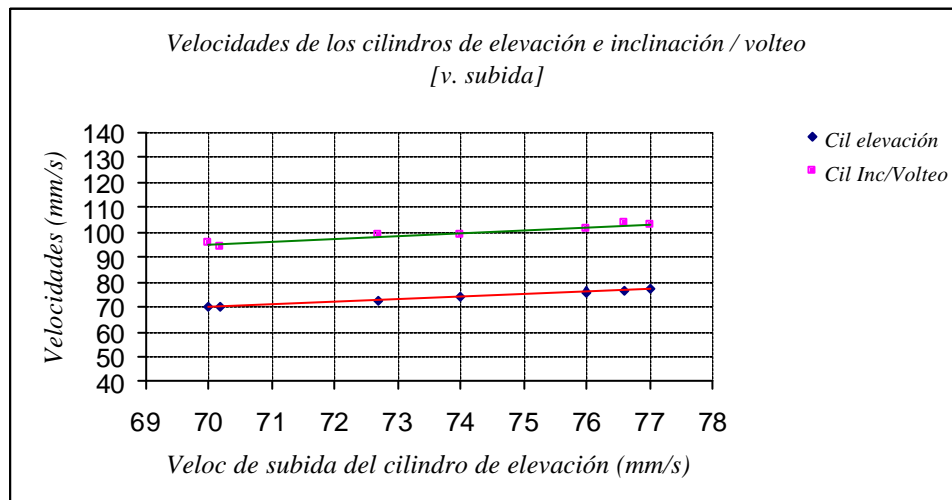


Figura 7.41 – Velocidades medias de los cilindros de elevación e inclinación / volteo en subida

Es necesario recalcar, que ambas variaciones se superponen provocando una desviación en el comportamiento del sincronizado.

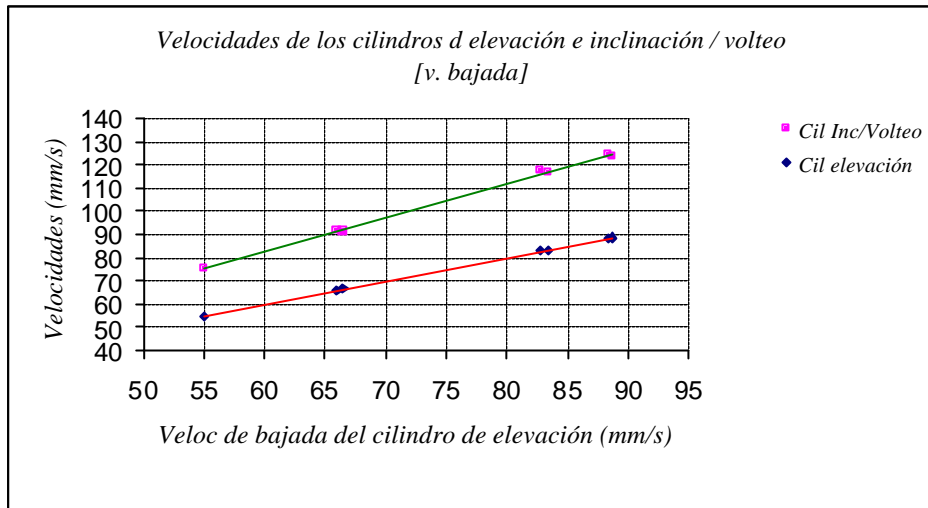


Figura 7.42 – Velocidades medias de los cilindros de elevación e inclinación / volteo en bajada

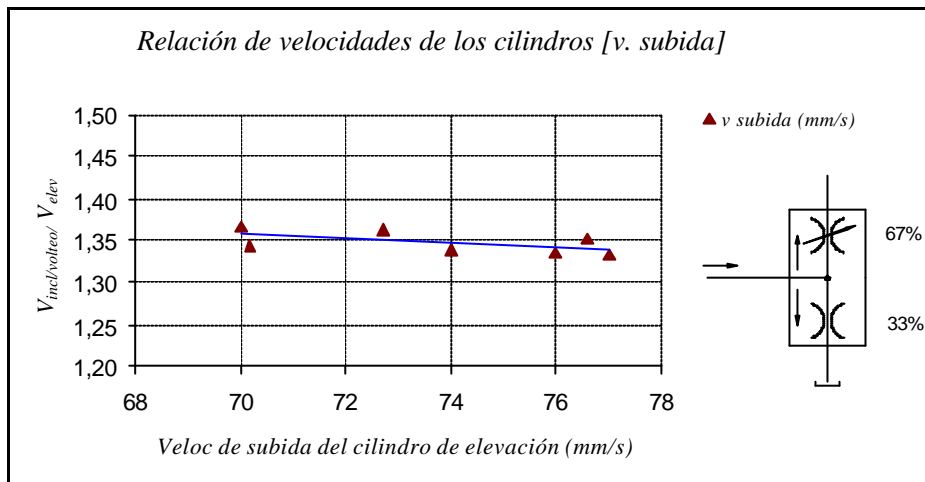


Figura 7.43 – Relación de velocidades de sincronizado en subida

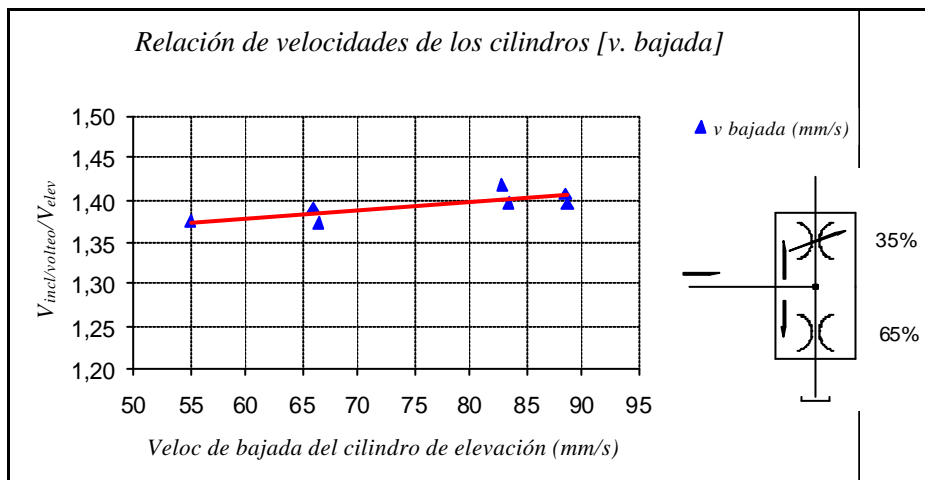


Figura 7.44 – Relación de velocidades de sincronizado en bajada

En la figura 7.45, puede observarse el error acumulativo cuando se aumenta la velocidad del movimiento de elevación. En la figura 7.46 puede observarse el mismo error acumulativo cuando se aumenta la velocidad de movimiento de bajada.

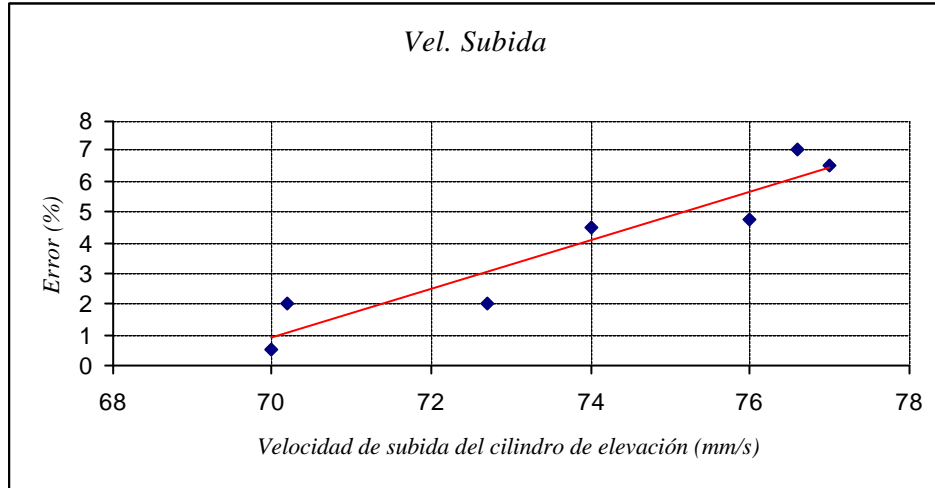


Figura 7.45 – Error acumulativo durante el movimiento de subida del mecanismo base

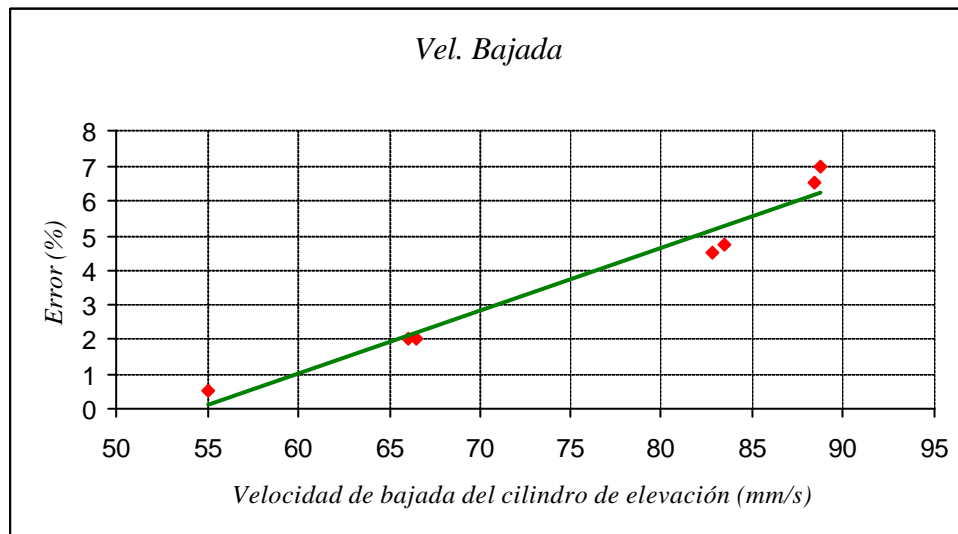


Figura 7.46 – Error acumulativo durante el movimiento de bajada del mecanismo base

Por último, en las figuras 7.47 y 7.48 se muestran un estudio comparativo entre resultados obtenidos con los ensayos de los modelos de simulación y los resultados obtenidos experimentalmente. La correlación es notable.

Para el mecanismo estudiado, las particiones de caudal son:

Para la subida

<i>Valores teóricos</i>	<i>Valores medios experimentales</i>
65.5 %	67.0 %
34.5 %	33.0 %

Para la bajada

<i>Valores teóricos</i>	<i>Valores medios experimentales</i>
34.4 %	35.0 %
65.6 %	65.0 %

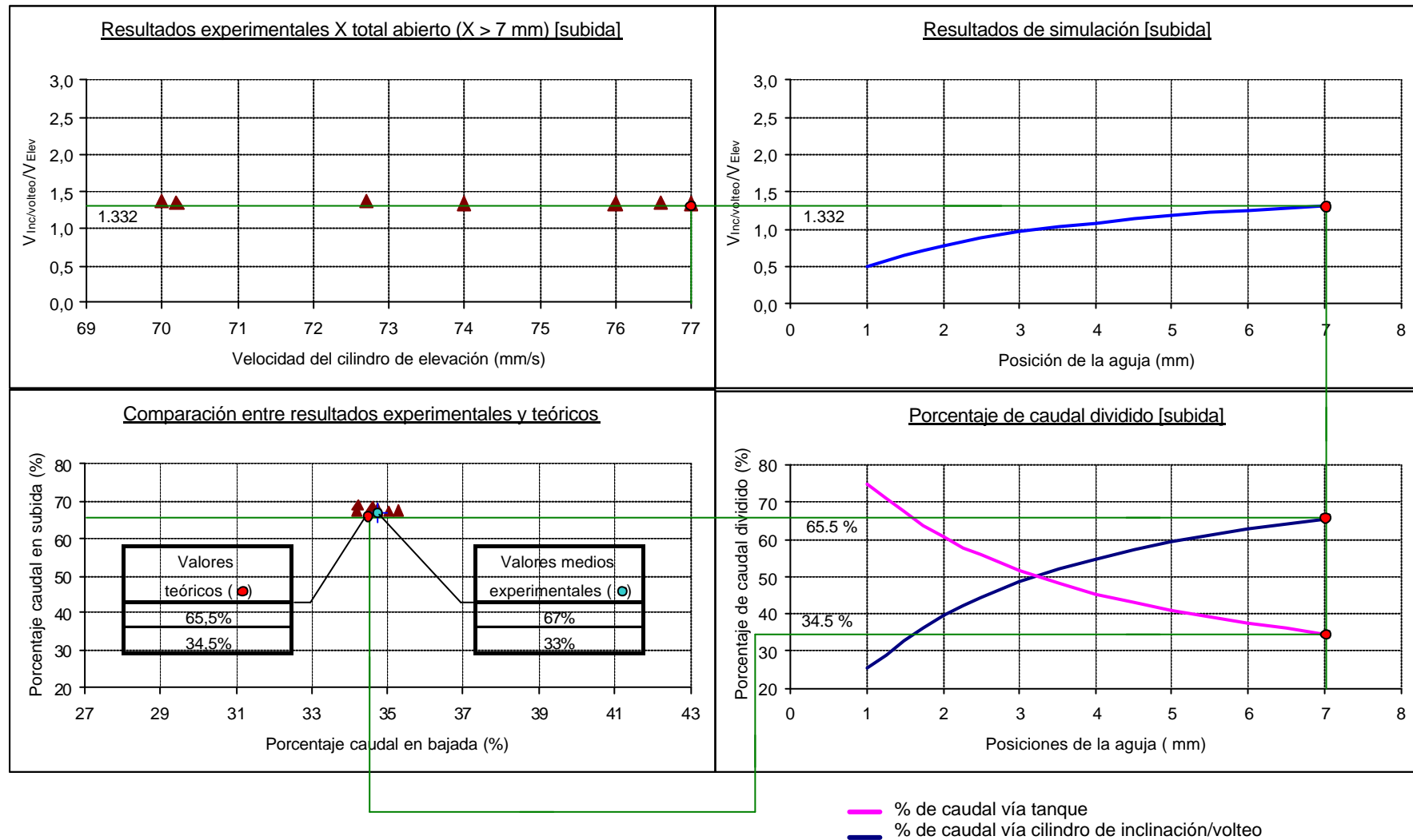


Figura 7.47- Gráficos comparativos entre los resultados obtenidos en los ensayos de los modelos de simulación y los obtenidos experimentalmente durante el ciclo de subida

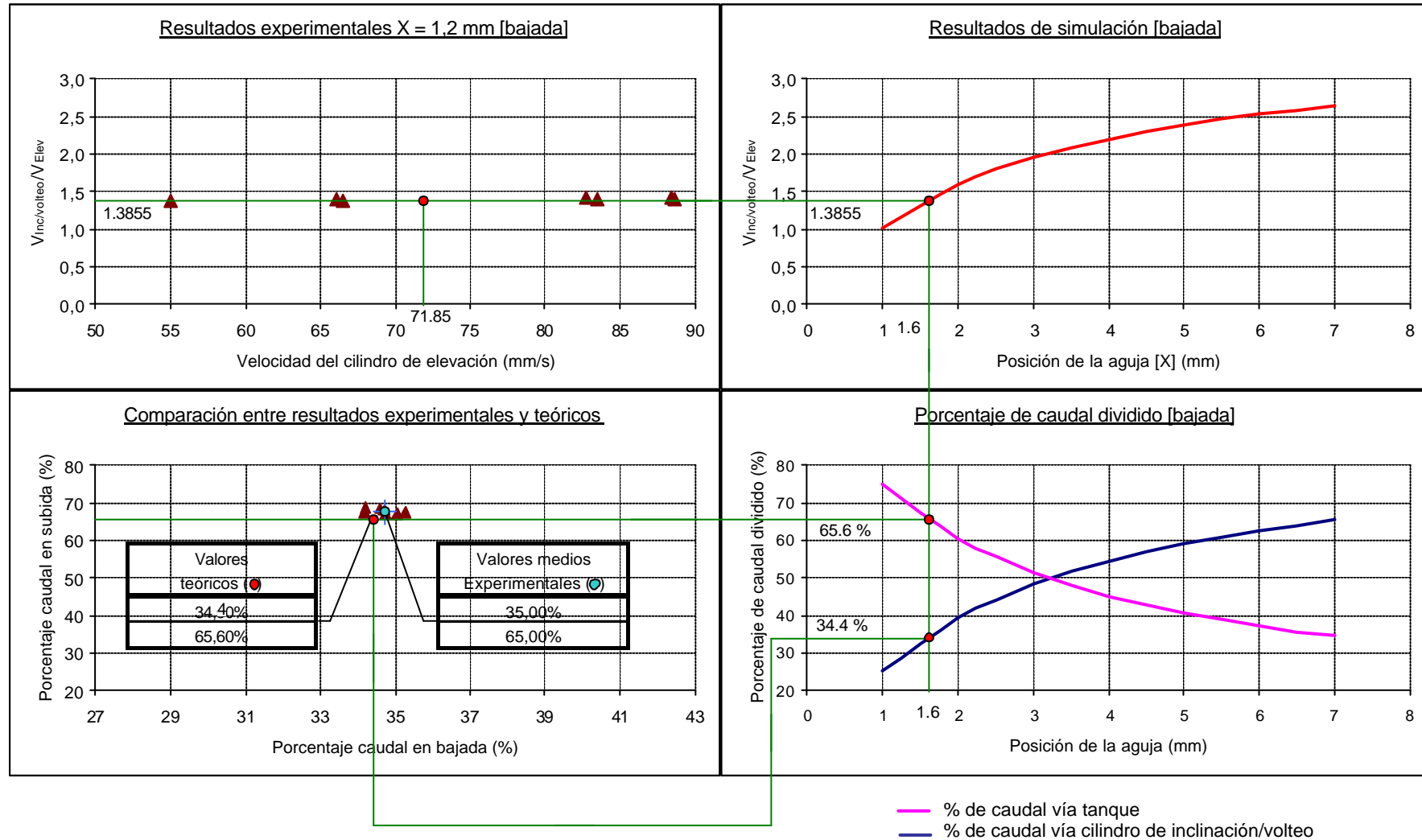


Figura 7.48.- Gráficos comparativos entre los resultados obtenidos en los ensayos de los modelos de simulación y los obtenidos experimentalmente durante el ciclo de bajada