

OPTIMIZACIÓN  
DE  
SUSPENSIONES HIDRONEUMÁTICAS  
CON  
AMORTIGUADOR INTEGRADO

TESIS

presentada para la obtención del

GRADO DE DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL

por

Salvador Augusto de las Heras Jiménez

Ingeniero Industrial



**UPC**  
BIBLIOTECA RECTOR DON JUAN FERRATE  
Campus Nord

Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Terrassa  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Diciembre 1996

## VII.2 ENSAYO DE LA VÁLVULA AMORTIGUADORA

Para la obtención de la característica presión *vs* caudal de la válvula amortiguadora tipo limitadora de la suspensión ensayada, fue preciso construir un cilindro ex profeso que reuniera los requisitos siguientes:

- agrupar los elementos que constituyen la válvula a estudiar, mostrados en la Figura V.4;
- ser geoméricamente semejante al cilindro de suspensión original, para así asegurar la semejanza del flujo;
- ser de fácil montaje y desmontaje, para poder realizar pruebas con diferentes secciones de paso, anillos de válvula, muelles, etc. a sentimiento; y
- permitir la ubicación de los sensores de presión.

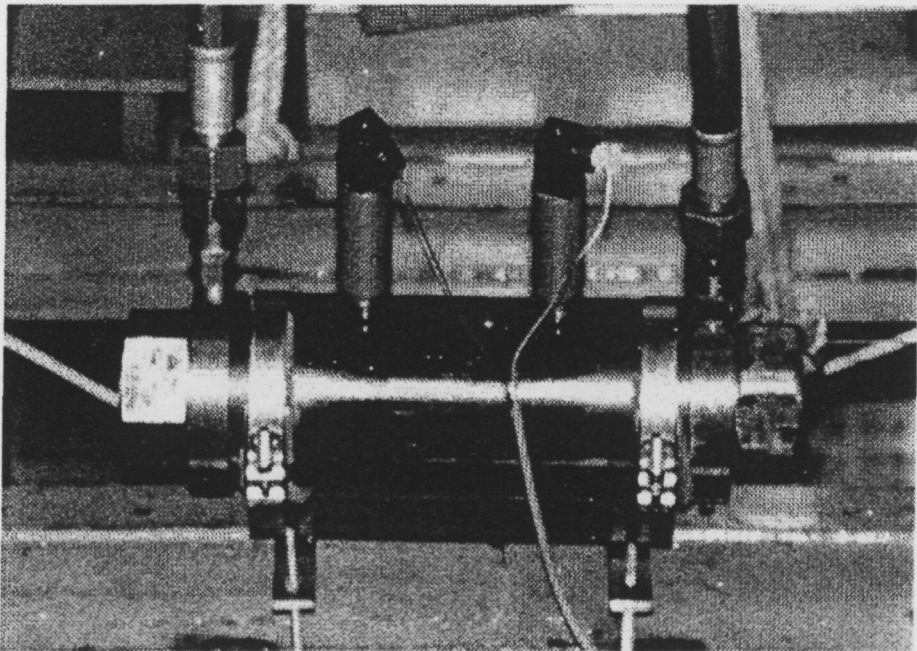


Figura VII.12 Cilindro para la caracterización experimental de la válvula amortiguadora.

## VII.2.1 DESCRIPCIÓN

El cilindro de ensayo comentado se colocó en un banco hidráulico provisto de:

- un convertidor de frecuencia de ABB Motors de potencia máxima  $110kW$  e intensidad nominal  $216A$ , modelo ACS-503-140-3-00P2000;
- un motor de alterna de  $110kW$ , marca ABB y modelo M2BA-315-SMA-4-B3-IP55, con 4 polos, potencia nominal de  $110kW$ , rendimiento del 95,5% y un factor de potencia de 0,88;
- una bomba hidráulica de engranajes internos de la marca VOITH, modelo IPH 5-84, de una presión máxima de trabajo de  $300bar$ , con  $3000rpm$  de velocidad máxima y  $500rpm$  de mínima, y  $10l/min$  de caudal nominal.

La regulación del caudal se hizo variando las revoluciones del motor de accionamiento entre los límites de funcionamiento de la bomba.

### VII.2.1.1 Aparamenta e instrumentación

Se utilizaron los mismos transductores Druck PTX-610 que en el banco de suspensiones anterior, los cuales fueron colocados tal como se indica en la Figura VII.12. La preparación y acondicionamiento de la señal proveniente de cada transductor siguió el mismo procedimiento que el indicado en VII.1.1.2 y en la Figura VII.2, de forma que pudiera registrarse por el analizador de espectros SD-390.

La temperatura del aceite se midió mediante un termómetro de mercurio directamente del depósito de aspiración.

### VII.2.1.2 Procedimiento experimental y ensayos realizados

Con el motor girando a unas revoluciones determinadas, se dejaba progresar al sistema libremente para que el aceite se calentara de forma paulatina. A intervalos prefijados de temperatura se registraban las presiones a entrada y salida, la temperatura del aceite y el caudal circulante. Se realizaron ensayos en ambos sentidos de flujo y en el rango de caudales comprendido entre  $[25;105]l/min$ . Los resultados obtenidos se mostraron en las Figuras V.8 y V.9.

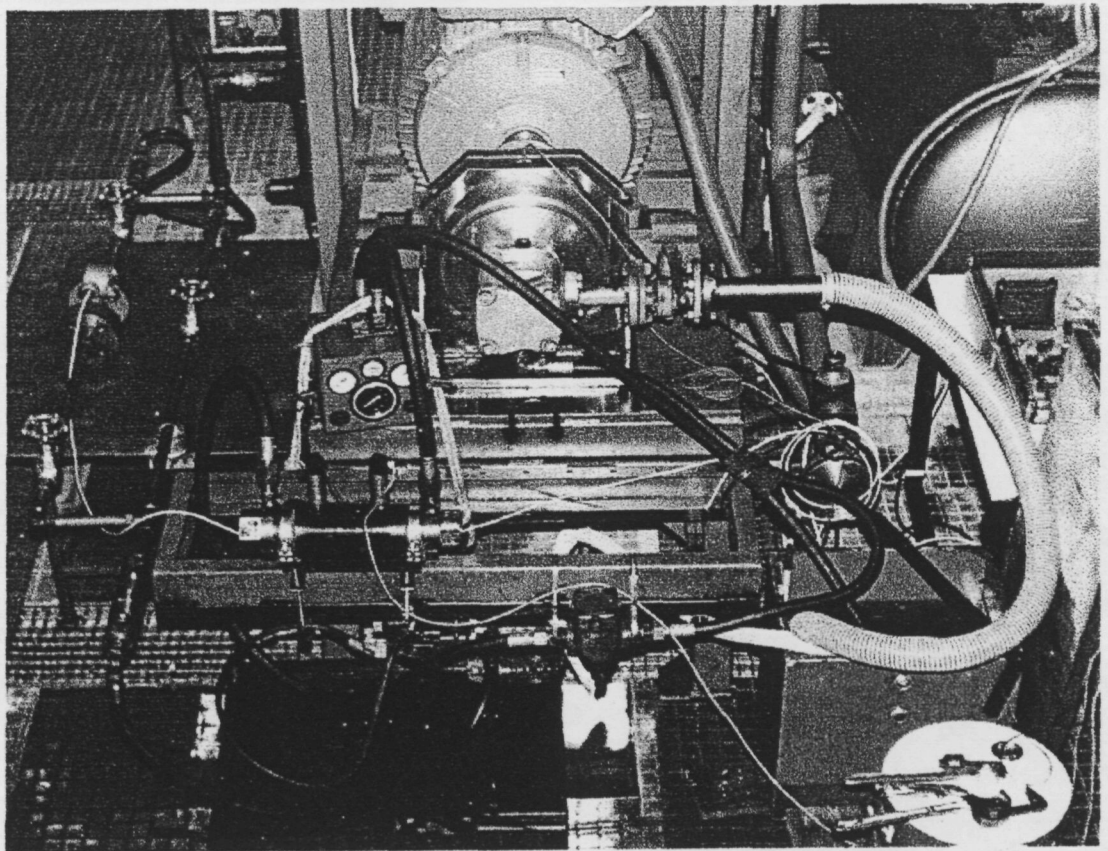


Figura VII.13 Vista frontal del montaje e instalación hidráulicos para la determinación de las curvas características presión vs caudal de la válvula amortiguadora.

## VII.3 CARACTERIZACIÓN DE LA TOBERA NEUMÁTICA

El banco de pruebas neumático posibilita la obtención de las curvas experimentales caudal *vs* presión de un elemento neumático cualquiera, permitiendo la determinación de los parámetros  $C$ , conductancia, y  $b$ , relación crítica de presiones, de acuerdo con las curvas de ajuste de las Normas Internacionales CETOP RP50P e ISO 6358.

### VII.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

El banco de ensayo ha sido diseñado para que se obtenga una elevada precisión y repetitividad en los resultados. La medida del caudal volumétrico se realiza conforme las especificaciones técnicas de la Norma ISO 5167 con un dispositivo tipo diafragma. La adquisición de los datos está automatizada mediante los correspondientes transductores de presión y temperatura y un sistema de adquisición compatible PC. La fuente motriz del banco es un compresor de tornillo de 90kW de potencia instalada.

El banco, cuyo esquema se muestra en la Figura VII.14, consta de los siguientes elementos:

- **v**, válvulas de paso de bola de dos vías para la desconexión del banco del grupo de producción y preparación del aire comprimido;
- **F**, filtro de aire con separación adicional de condensados;
- **R1** y **R2**, válvulas para la regulación de la presión de entrada  $P_E$ ;
- **A1** y **A2**, racores rápidos para el acoplamiento mecánico del elemento a ensayar;
- **c1** y **c2**, tubos de conexión al banco y de medida de las presiones  $P_E$  y  $P_S$ , contruidos según las especificaciones de las normas arriba indicadas;
- **E**, elemento neumático motivo de ensayo;

- **D**, diafragma para la medida del caudal volumétrico. Según la Norma ISO 5167 se requiere la lectura de P1, DP y T;
- **L**, válvula reguladora de caudal controlada remotamente con R4;
- **S**, silenciador.

### VII.3.1.1 Equipos para la producción de aire comprimido

El sistema de producción y preparación consta de:

- un compresor de tornillo, marca MANNESMANN DEMAG, modelo SE-126-S con una potencia instalada de 90kW. El compresor puede proporcionar  $10Nm^3/min$  a una presión de servicio máxima de 10bar;
- un depósito a presión de  $1500dm^3$  de capacidad;
- un secador frigorífico, marca CHAUMECA IBERICA, modelo ARTIC-300, que proporciona un punto de rocío de  $3^{\circ}C$  a  $5Nm^3/min$ .

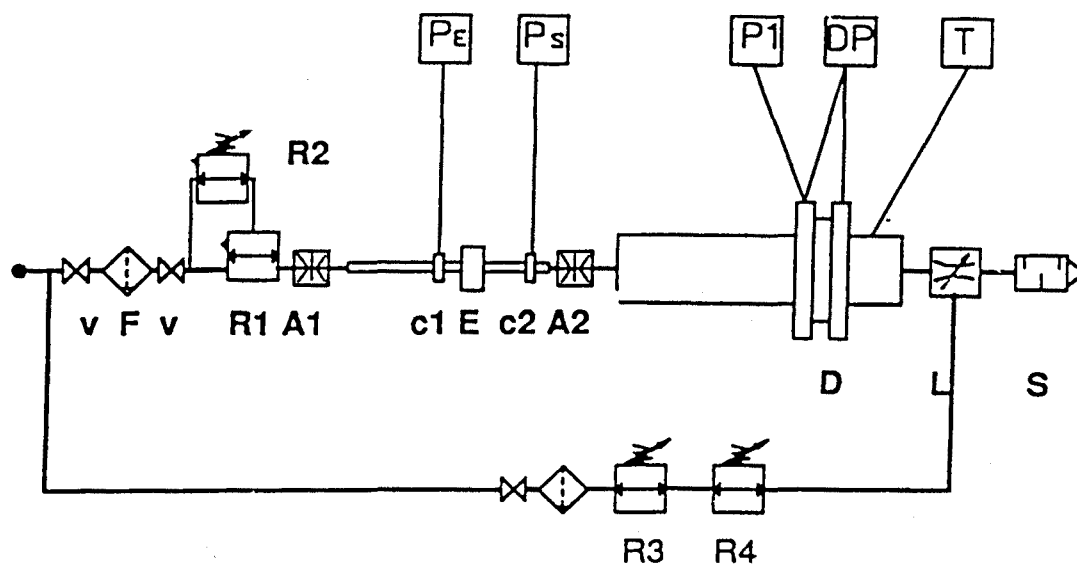


Figura VII.14 Esquema del banco de elementos neumáticos

### VII.3.1.2 Sistema para la adquisición de datos

La adquisición de los datos se realiza mediante un sistema SIXNET, modelo 60-IOMUX-RTU, tipo microprocesador industrial programable en lenguaje C y controlable desde un PC vía puerto serie RS232-C. La tarjeta de entradas analógicas que utiliza es la 60-FA/D8-DA4 en entorno 60-FAMI. Los datos pueden ser almacenados en formato ASCII para su ulterior tratamiento con el *software* adecuado.

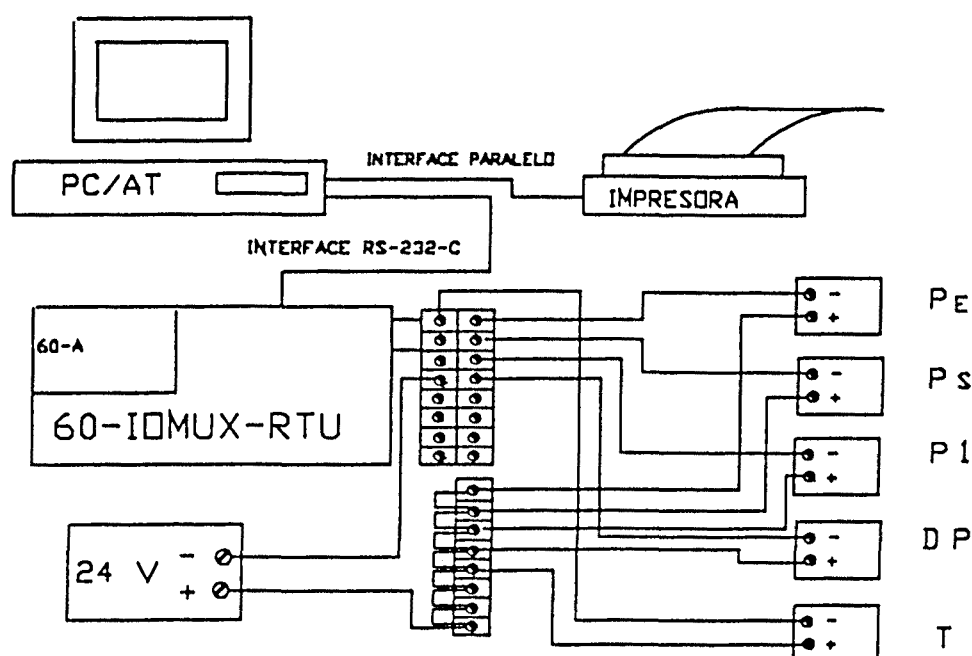


Figura VII.15 Conexión de los instrumentos involucrados en la adquisición, tratamiento y presentación de los datos obtenidos durante una prueba.

### VII.3.1.3 Aparatura e instrumentación

El banco neumático tiene instalados tres transductores de presión, marca FOXBORO, modelo 841GM, de un rango de trabajo de  $0 \div 10 \text{ bar}$  y una precisión del  $0,25\% \text{ FE}$ , para la lectura de  $P_E$ ,  $P_S$  y  $P_1$ . La salida es en corriente de  $4 \div 20 \text{ mA}$  y puede ser leída directamente por el sistema de adquisición.

Para el cálculo del caudal se necesita conocer además  $DP$ ,  $T$ , y la densidad del gas. La lectura de  $DP$  se realiza mediante un transductor diferencial, marca FOXBORO, modelo 823DP, cuyo rango de trabajo es de  $0\div 700\text{mmHg}$  con una precisión de  $0,25\%FE$ . La temperatura se mide con una sonda PT-100 conectada a un convertidor WEIDMULLER *Ohms/mA*. La presión atmosférica se lee en un barómetro en el momento del ensayo de forma que se calcule la densidad con  $P1_{\text{abs}}$ , y  $T$ .

#### VII.3.1.4 Ensayos realizados

En principio se pretendía conocer los coeficientes  $C$  y  $b$  de la tobera neumática para el diámetro original de  $1,5\text{mm}$  de forma que pudieran incorporarse al algoritmo de cálculo de  $m$  y así verificar la bondad de la simulación. De la ejecución del programa 2SUSPENS.AJO del Apéndice A6 se sabía el rango de valores de  $C$  que modificaban la característica dinámica de la cámara en la forma explicada al final del Capítulo IV, pero se desconocía los diámetros correspondientes<sup>1</sup> y si éstos eran *constructivamente* posibles.

Por ello, una vez evaluada su importancia y afianzada la creencia de que la rigidez neumática de la suspensión dependía sobremanera del valor de  $C$  por su influencia sobre  $n$ , se amplió el estudio a los diámetros de  $1$  y  $2\text{mm}$ . Los resultados se incluyeron ya en las Figuras IV.9 y IV.11 observándose como  $C$  presenta una tendencia casi lineal con la sección de la tobera. La relación crítica de presiones  $b$ , además de no variar significativamente, resultó ser una variable débil en el proceso.

Los ensayos fueron realizados en régimen permanente abriendo la válvula **L** y monotorizando las lecturas una vez estabilizadas, siempre de forma acorde con las Normas indicadas. Se realizaron ensayos para presiones de entrada

---

<sup>1</sup> Sí se preveía el orden de magnitud aproximado por los trabajos previos realizados en el laboratorio con diafragmas de diferentes orificios.



entre 3 y 8bar relativos. Resultó impracticable aumentar más el nivel de presión con el banco neumático utilizado en régimen permanente, por lo que se está estudiando la posibilidad de calcular alternativamente  $C$  y  $b$  mediante la descarga y consiguiente relajación del gas contenido en un depósito a presión según el método SSE [7,Codi]. La instalación para el ensayo transitorio se muestra en la Figura VII.16, siendo la base de futuros trabajos destinados a obtener la influencia de presiones elevadas sobre el flujo instantáneo.

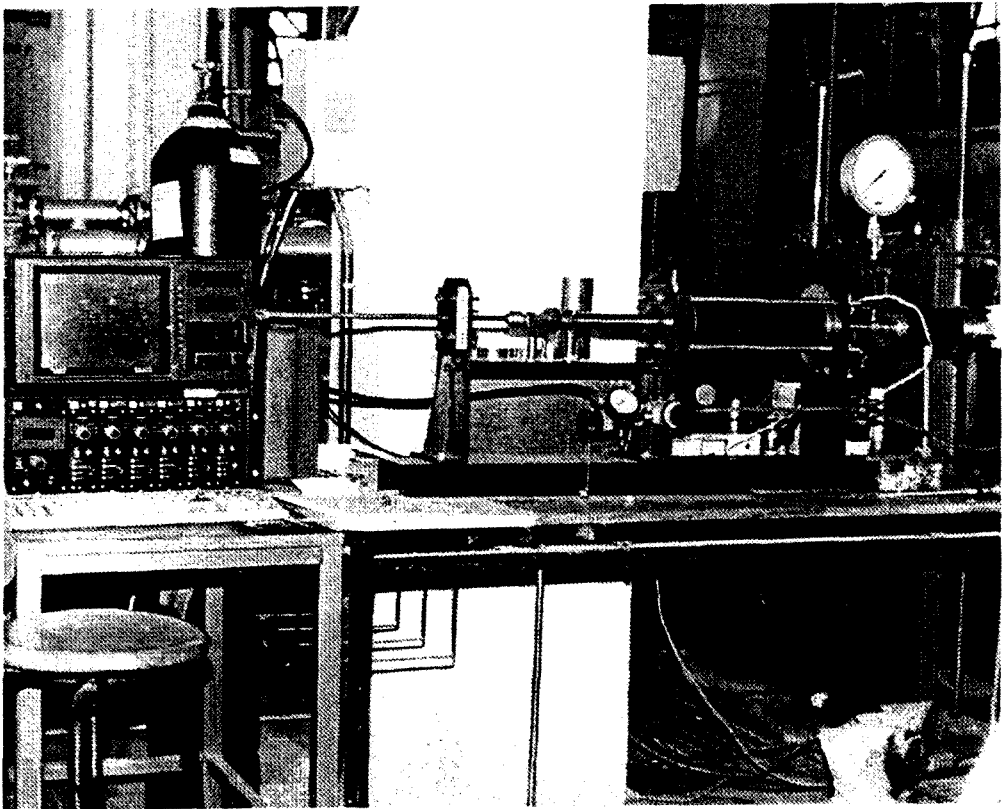


Figura VII.16 Banco neumático para pruebas en descarga. Previsión.

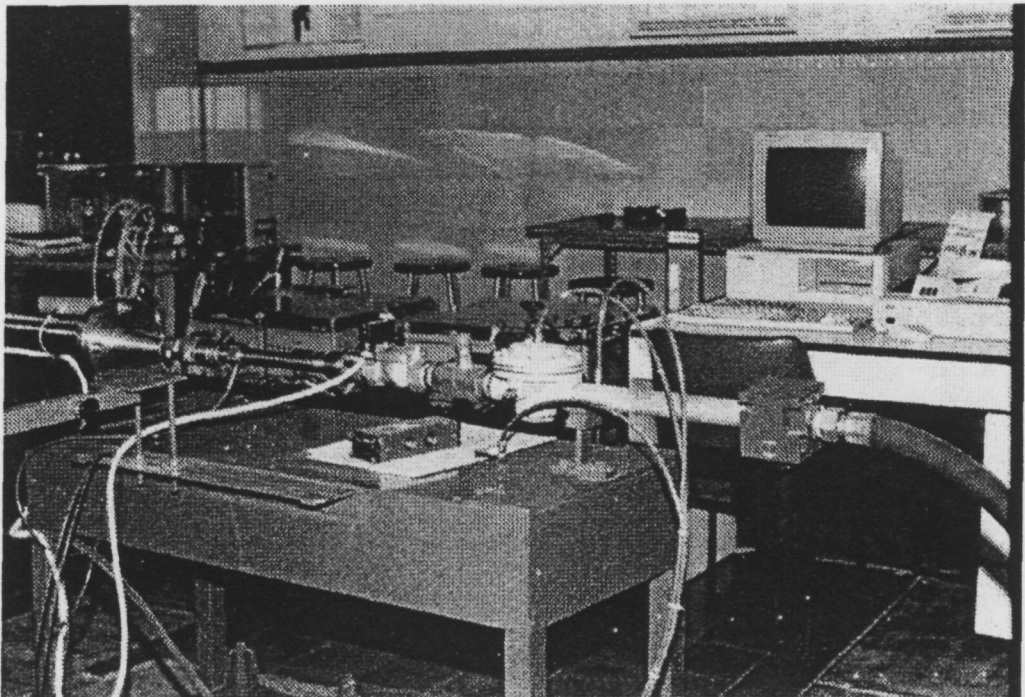
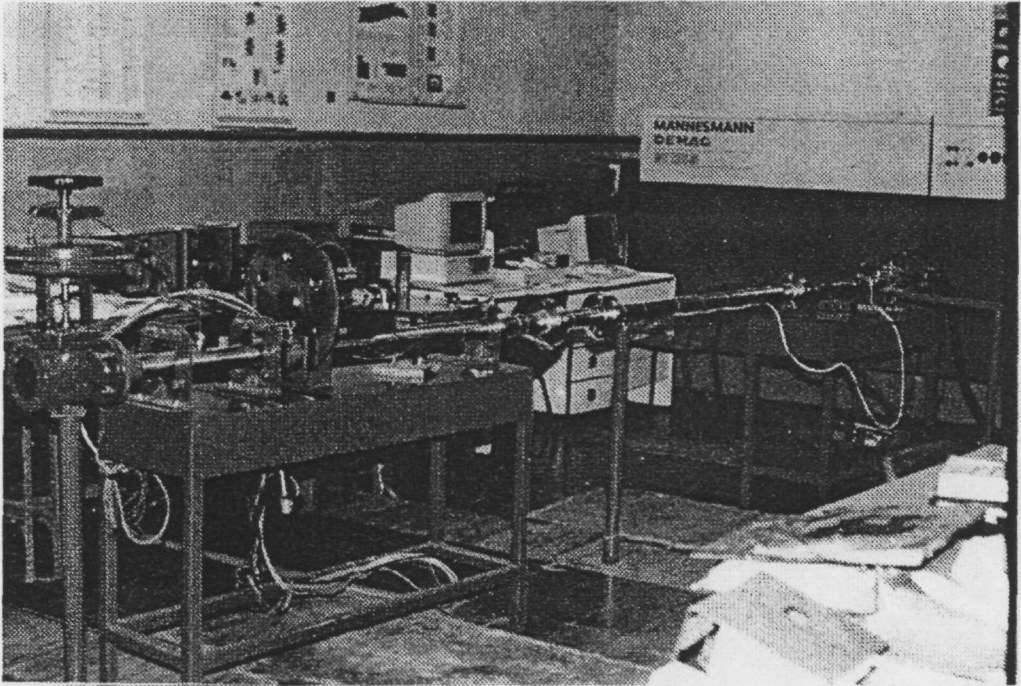


Figura VII.17 Vistas del banco de pruebas neumático.

## VIII. CONCLUSIONES

Los objetivos marcados en I.2 han sido cubiertos ampliamente. Se ha conseguido conocer con precisión el comportamiento dinámico de un cilindro de suspensión hidroneumático, y al mismo tiempo definirlo en función de un número limitado de factores. Tras el trabajo expuesto, se dispone de una simulación por ordenador que contempla los puntos vistos en VI.2 y ofrece excelentes resultados en el rango formal de trabajo de la suspensión, según se comprueba de su cotejo con la experiencia.

La optimización del cilindro de suspensión exigía en primer lugar su caracterización vía experimental. Se construyeron ex profeso dos bancos de pruebas para el ensayo del cilindro a ritmo constante y la determinación de la relación presión *vs* caudal de la válvula amortiguadora para ambos sentidos de movimiento. Los resultados obtenidos se resumieron en la Tabla VII.2, las figuras V.8, V.9, y VII.11 y el Apéndice A5.

El comportamiento elástico de la suspensión puede ser descrito mediante el uso del índice politrópico instantáneo vista su relación con la rigidez neumática de I.46 e I.54. De hecho, haber descubierto estas relaciones fue la causa principal que provocó ahondar más en los fenómenos de compresión involucrados en la cámara neumática, en la creencia de que sería posible obtener un método sencillo para el control de la rigidez dinámica, e indirectamente, de la frecuencia propia del sistema de suspensión. Para conseguirlo, el índice politrópico debía cambiar su relación causal, de modo que se desarrolló un algoritmo que calculara la presión y resto de variables termodinámicas evitando el empleo de la relación politrópica III.1 o, mejor, de la IV.76.

Con este nuevo planteamiento, el índice politrópico pasa a ser una salida del modelo y no una entrada. Puede utilizarse además para valorar la bondad, ajuste y precisión del algoritmo de cálculo, e incluso estimar las irreversibili-

dades internas generadas mediante una expresión del tipo III.74 ó III.95. Llegado a este punto, parecía evidente que la manipulación de las irreversibilidades internas influiría en el índice politrópico, éste en la rigidez neumática y al final y en consecuencia, también en la frecuencia propia.

La configuración discontinua de la Figura IV.2 conecta ambas cámaras neumáticas mediante una tobera a través de la cual es posible el flujo de energía definido en IV.25 ó VI.4. La tobera es en el fondo una resistencia local al flujo de masa entre cámaras que provoca unas determinadas "pérdidas de carga" y cuya influencia sobre el índice politrópico se justificaba en IV.4.1. En definitiva, se ha encontrado un método de variar el índice politrópico de forma sencilla, consistente en la implantación de una válvula neumática *proporcional*.

Es innegable que si se pretende diseñar un dispositivo no pasivo de suspensión habrá de implementarse un algoritmo que lo gobierne en función del estado del sistema y de las excitaciones externas, de modo que se adapte a las diversas circunstancias de funcionamiento en tiempo real. En el Capítulo I se comentaron las ventajas de un sistema que pudiera escoger de entre un juego de rigideces para explotar al máximo las posibilidades de carrera de suspensión. En el Capítulo II se presentaron las técnicas de control más corrientes, observándose cómo ninguna de las estrategias comentadas se preocupaba de modificar la rigidez de la suspensión al no considerarse un parámetro disponible. No parecen existir, o bien no se han encontrado, algoritmos que trabajen con el coeficiente de amortiguación y la rigidez al unísono de forma *semi-activa* o adaptativa.

Las suspensiones autonivelantes permiten insensibilizar al sistema ante cambios de la carga estática trabajando siempre en la carrera media. No obstante, al no contemplar la posibilidad de variar la rigidez para diferentes calzadas o velocidades, la carrera útil de suspensión continua quedando restringida a un cierto porcentaje de la total disponible.

Respecto al coeficiente de amortiguación definido en I.38 o V.2, parece claro ahora que no depende exclusivamente de la característica presión *vs* caudal de la válvula amortiguadora y ni es siquiera proporcional a la velocidad instantánea de proceso. En esta Tesis han sido estudiados otros efectos como el rozamiento por *stick-slip*, la geometría interna, definida en función de la relación entre secciones normales que en cada caso haya lugar, o la temperatura del aceite, observándose su influencia sobre el conjunto y deduciéndose aquellas expresiones que permiten calcular  $C$  de forma aproximada. El fenómeno de *stick-slip* es tan discontinuo que no puede ser incluido de forma analítica mediante una expresión sencilla. En V.3.2 se ha desarrollado un método para su implementación en un programa de simulación por ordenador. En cualquier caso, sí parece que la válvula sea el efecto predominante en la amortiguación, por lo que se estudió la dinámica de apertura y cierre de una construcción común en limitadora mediante BondGraph.

Recapitulando, merece la pena extraer los siguientes conceptos de esta Tesis Doctoral:

1. se ha demostrado que la rigidez dinámica de una suspensión hidroneumática puede definirse como una función continua de su geometría interna, de la presión absoluta del gas y del índice politrópico instantáneo del proceso de compresión, según las expresiones [I.44], [I.46], [I.54];
2. se ha realizado un estudio exhaustivo de la termodinámica irreversible del proceso de compresión obteniéndose un algoritmo de carácter general que permite estimar la evolución de las magnitudes de estado de interés, tanto para la configuración simple en III.3 como para la discontinua en IV.2, sin necesidad de utilizar una expresión politrópica. El algoritmo se sirve de la hipótesis de *equilibrio local* expuesta en el apartado III.4.1, para considerar magnitudes promediadas espacialmente, y de la *constante de tiempo térmica*,  $\tau$ , definida en

- [III.12] y [III.31], y calculable de [III.10], para evaluar el calor intercambiado con la pared del contenedor por el gas;
3. se han obtenido los límites naturales del índice politrópico medio, demostrándose que  $\gamma$  es su límite superior sólo en el caso de que la compresión sea adiabática y además se realice de forma cuasiestática, es decir sea isentrópica. Cualquier contribución de calor al gas, incluyendo el calor interno generado por rozamiento, hace aumentar el valor del índice politrópico, como demuestran las expresiones [III.72] y [III.94] para el gas ideal y real respectivamente. Esta conclusión por fin explica que se obtengan valores de  $n$  superiores a 1,4 experimentalmente, y que incluso tomar valores de  $\gamma$  correspondientes a gas real sea insuficiente para justiciar esta diferencia;
  4. se han deducido las expresiones [III.57] y [III.58] para el cálculo del índice politrópico instantáneo, las cuales han demostrado ser de suma utilidad cuando se trabaja con ecuaciones en diferencias o derivadas. Por ejemplo, haciendo uso de las anteriores definiciones del índice politrópico se derivaron las expresiones [III.74] y [III.95] que permiten estimar el calor irreversible interno generado;
  5. se ha deducido teóricamente la expresión que permite representar en diagramas  $T$ - $s$  las líneas isotrópicas que definen el *estado de proceso* de la compresión mediante una trayectoria  $\langle j \rangle$  y un índice politrópico instantáneo  $\langle n \rangle$ . Es necesario convenir que la termodinámica clásica no define variables en estado de no equilibrio por lo que, ortodoxamente, no sería posible definir trayectoria alguna en un diagrama  $T$ - $s$ . Bajo la hipótesis de equilibrio local y, si se prefiere, utilizando la entropía estadística, se consigue un planteamiento más práctico y actual del problema que resuelve tal indeterminación;

6. se ha caracterizado de forma exacta la transferencia de energía a través de la tobera neumática que conecta ambas cámaras de la configuración discontinua. El flujo de energía total incluye el transporte entálpico y el calor interno conducido e irradiado según la ecuación de compatibilidad [IV.26]. En general, el calor interno es de escasa cuantía aunque es necesaria su inclusión en el programa de simulación si se quiere que el sistema alcance el equilibrio total;
7. para el cálculo del flujo másico entre cámaras se ha utilizado el procedimiento indicado por la Norma Internacional ISO 6358 para lo cual fue necesario determinar los parámetros reales  $C$  y  $b$  de la tobera neumática. Los resultados se indican en las Figuras IV.9 y IV.11;
8. se ha elaborado un programa de ordenador con el apoyo de las técnicas del BondGraph, que incluye los puntos de VI.2 y los gráficos mostrados en el Capítulo VI. El ajuste que se obtiene de la experiencia es excelente en un amplio rango de trabajo lo cual autoriza, siempre con la precaución debida, a la extrapolación de prestaciones a situaciones o configuraciones no ensayadas. De esta forma se derivan las conclusiones de IV.5. Los resultados indican que la configuración discontinua provista de una tobera *activa*, es decir, una tobera cuya conductancia  $C$  pueda ser variada a voluntad, es capaz de comportarse como una cámara de rigidez variable que trabajara entre dos situaciones extremas: tobera completamente cerrada, ecuación [IV.85], y tobera completamente abierta, ecuación [IV.86];
9. se ha demostrado en V.1.3 que el coeficiente de amortiguación de una suspensión hidroneumática no depende solamente de la característica presión *vs* caudal de la válvula amortiguadora. Es más, el carácter discontinuo del *stick-slip* hace difícil definir la amortiguación mediante una función de la velocidad relativa, como en [I.7] ó [I.38], por lo

que se ha preferido implementar el rozamiento por separado según se explica en V.3;

10. se ha estudiado también la influencia de la dinámica de apertura y cierre de la válvula amortiguadora o de la temperatura de trabajo sobre la característica presión *vs* caudal de la válvula amortiguadora tipo limitadora ensayada. Los resultados correspondientes se indicaron en V.8, V.9 y V.11, V.12 y V.13.

En la actualidad se están realizando trabajos en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la ETSEI de Terrassa destinados a definir con mayor precisión el flujo total de masa a través de la tobera. Se desconoce todavía la influencia de la frecuencia de excitación sobre las características dinámicas del flujo o cómo se ha de modificar, si éste es el camino, la ecuación propuesta por la Norma ISO 6358 para incluir el efecto de altas presiones de trabajo, de la difusión por diferencias de densidad, o de otros fenómenos de transporte molecular de importancia menor por su cuantía, como por ejemplo la termodifusión con acoplamiento de efectos Soret y Dufour.

Sería conveniente modificar el banco actual para poder realizar en él ensayos con cargas radiales fluctuantes y así observar el desgaste de guías y juntas, o su vida a fatiga, ante tales esfuerzos. La línea marcada incita a profundizar más cada día en el conocimiento de los cilindros hidroneumáticos de suspensión y sus componentes, de forma que cualquier mejora de tales elementos sea el resultado de la acción combinada sobre varios factores y no radique solamente en el perfeccionamiento de los algoritmos de control y la electrónica de mando.

Los cilindros de suspensión hidroneumáticos reúnen la elasticidad y el efecto amortiguador en un único elemento. Lo hacen además de forma compacta y accesible desde el exterior, por lo que convertirlos en elementos *semi*-activos según alguno de los métodos tradicionales comentados en el Capítulo II no



constituye un problema insalvable. Gracias a las cualidades propias de la cámara neumática, permiten la incorporación de un sistema autonivelante sin demasiadas complicaciones y, además, cómo se ha explicado en esta Tesis Doctoral, la configuración discontinua ofrece la posibilidad de variar la rigidez neumática mediante la actuación sobre la sección de paso a través de la tobera. Por todas estas razones se prevé un futuro muy prometedor para esta clase de sistemas.

El autor espera haber contribuido al mejor entendimiento de las suspensiones hidroneumáticas con amortiguador integrado, con la firme intención de continuar trabajando en las líneas abiertas, e invitando a quien quiera sugerir, debatir o examinar alguna cuestión particular, a entablar contacto en aras de la ciencia y el buen hacer.



## Apéndice A1. PROPIEDADES DE GAS REAL

En esta Tesis Doctoral se han utilizado propiedades reales del nitrógeno obtenidas mediante ajuste funcional de los valores tabulados en la NBS 648 [25,N<sub>2</sub>]. El rango de aplicación de las expresiones encontradas es el siguiente:

- [-25,550]°C en temperatura y
- [0,225]bar en presión.

En concreto, vista la tendencia de las curvas  $c_v\langle p \rangle$ ,  $c_v\langle T \rangle$ ,  $\gamma\langle p \rangle$ ,  $\gamma\langle T \rangle$ ,  $K_T\langle p \rangle$  y  $K_T\langle T \rangle$ , se han ensayado ajustes de la forma<sup>1</sup>

$$c_v = a + bp - cp^2$$

$$\gamma = a + bp - cp^2$$

$$\frac{K_T}{p} = 1 + bp + cp^2$$

cuyos resultados se muestran a continuación gráfica y analíticamente.

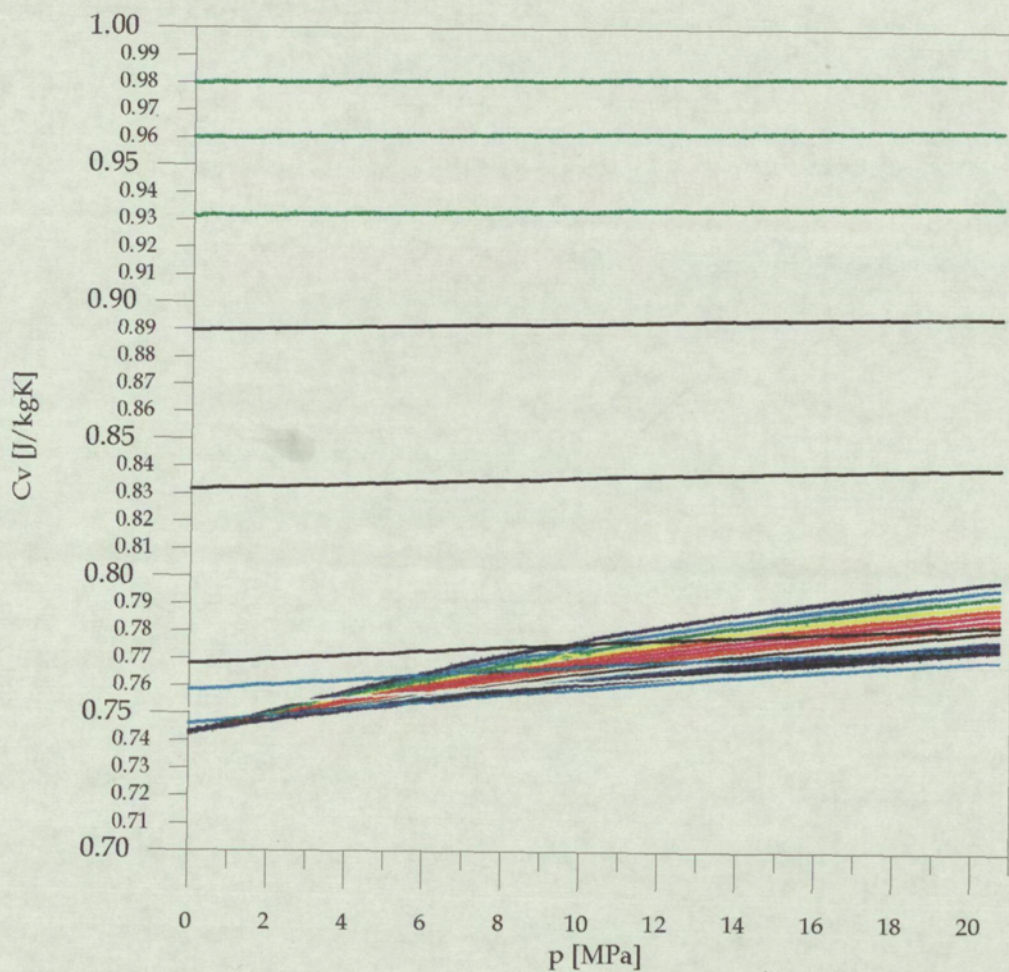
El calor específico a presión constante se obtiene haciendo

$$c_p = \gamma c_v$$

Al final del Apéndice A1 se representan ambos calores específicos,  $c_p$ ,  $c_v$ , y su ratio,  $\gamma$ , en sendos diagramas  $T$ -s.

---

<sup>1</sup>  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros función de la temperatura reducida. Nomenclatura del Capítulo III, por ejemplo.



$$c_v = a + bp - cp^2 \quad [\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}]$$

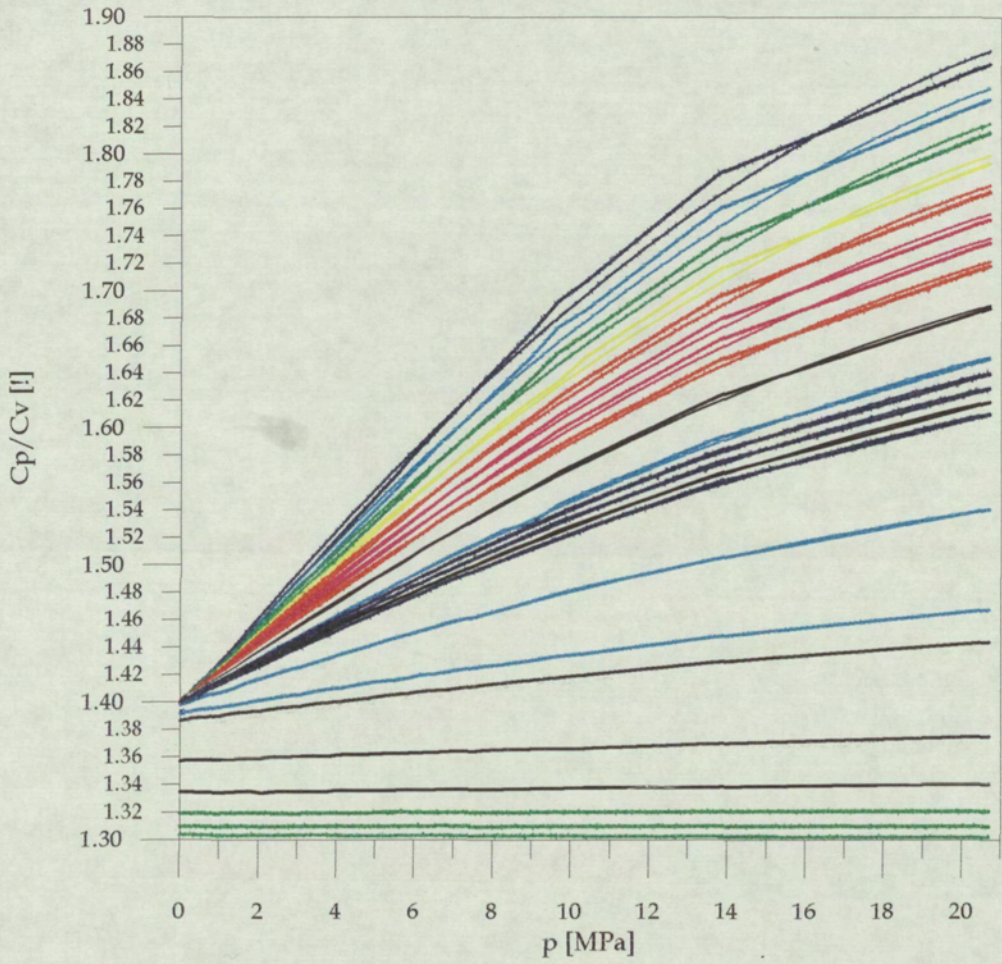
con

$$a = 0,774988 - 0,0309433T_r + 0,00793409T_r^2$$

$$b = 0,0120795T_r^{-1,81261}$$

$$c = 0,000382675T_r^{-2,85939}$$

El error máximo cometido en el rango indicado es del 0,21%.



$$\gamma = a + bp - cp^2$$

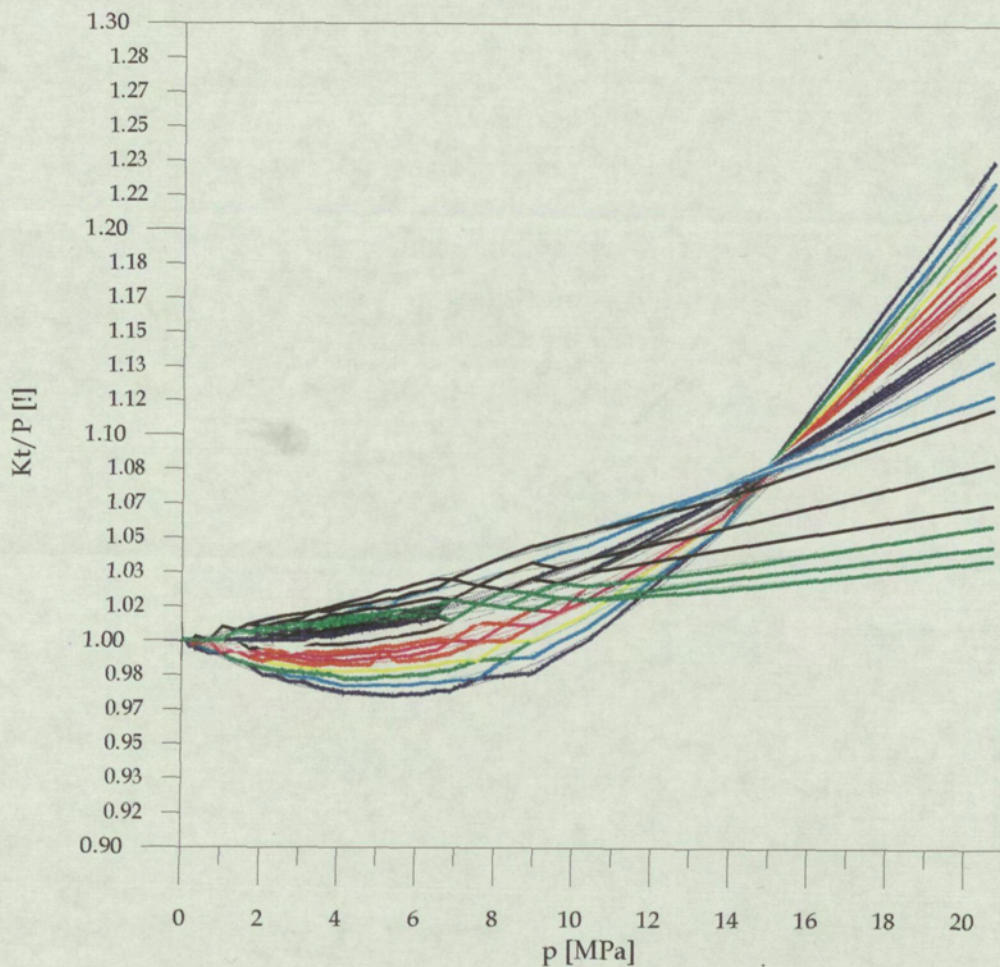
con

$$a = 1,33086 + 0,0563388T_r - 0,0139935T_r^2$$

$$b = 0,220606T_r^{-2,81029}$$

$$c = 0,00510423T_r^{-3,35663}$$

El error máximo cometido en el rango indicado es del 0,24%.



$$\frac{K_T}{p} = 1 + bp - cp^2$$

con

$$b = -0,155765 + 0,138321T_r - 0,0403538T_r^2 + 0,00395199T_r^3 \quad \text{si } T_r < 4,0$$

$$b = 0,00478556 \quad \text{en otro caso, y}$$

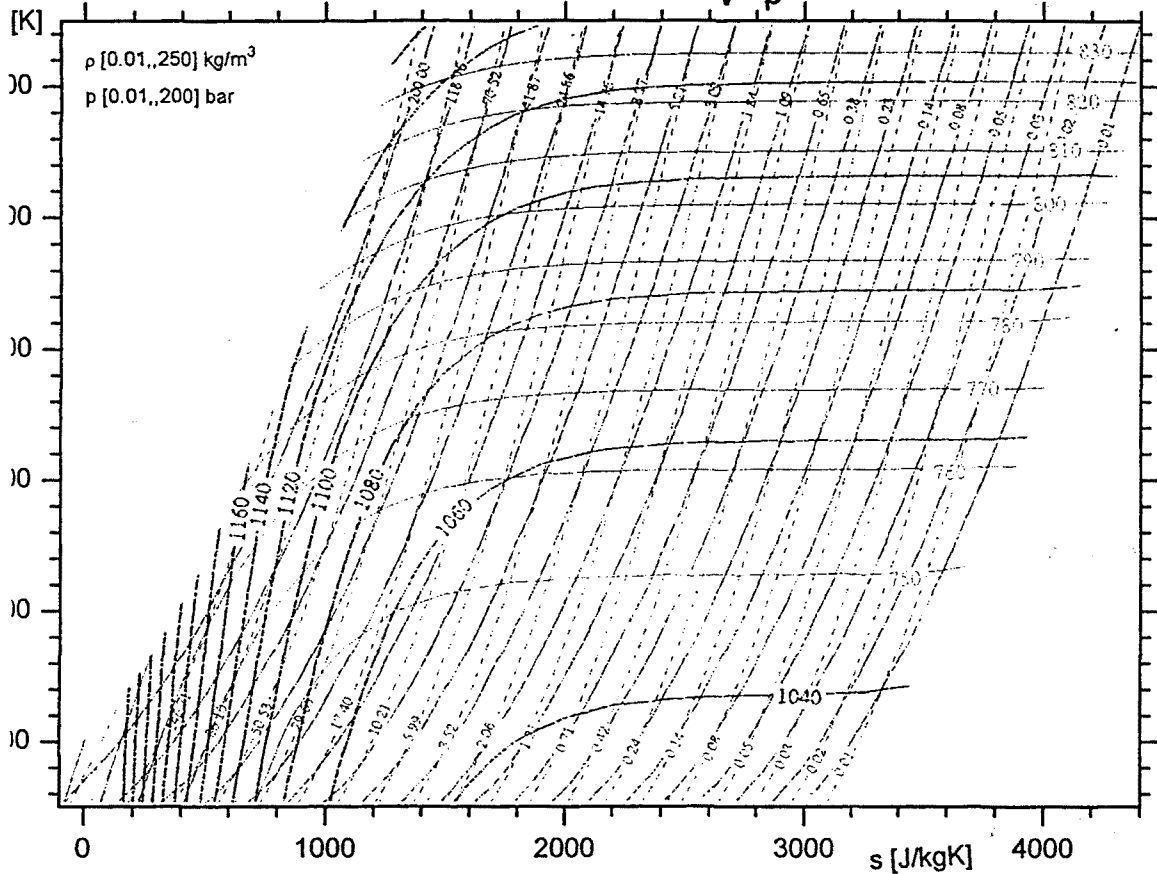
$$c = 0,0106697T_r^{-3,56983}$$

El error máximo cometido en el rango indicado es del 0,53%.

### Capacidades Caloríficas

$$C_v C_p \text{ [J/kgK]}$$

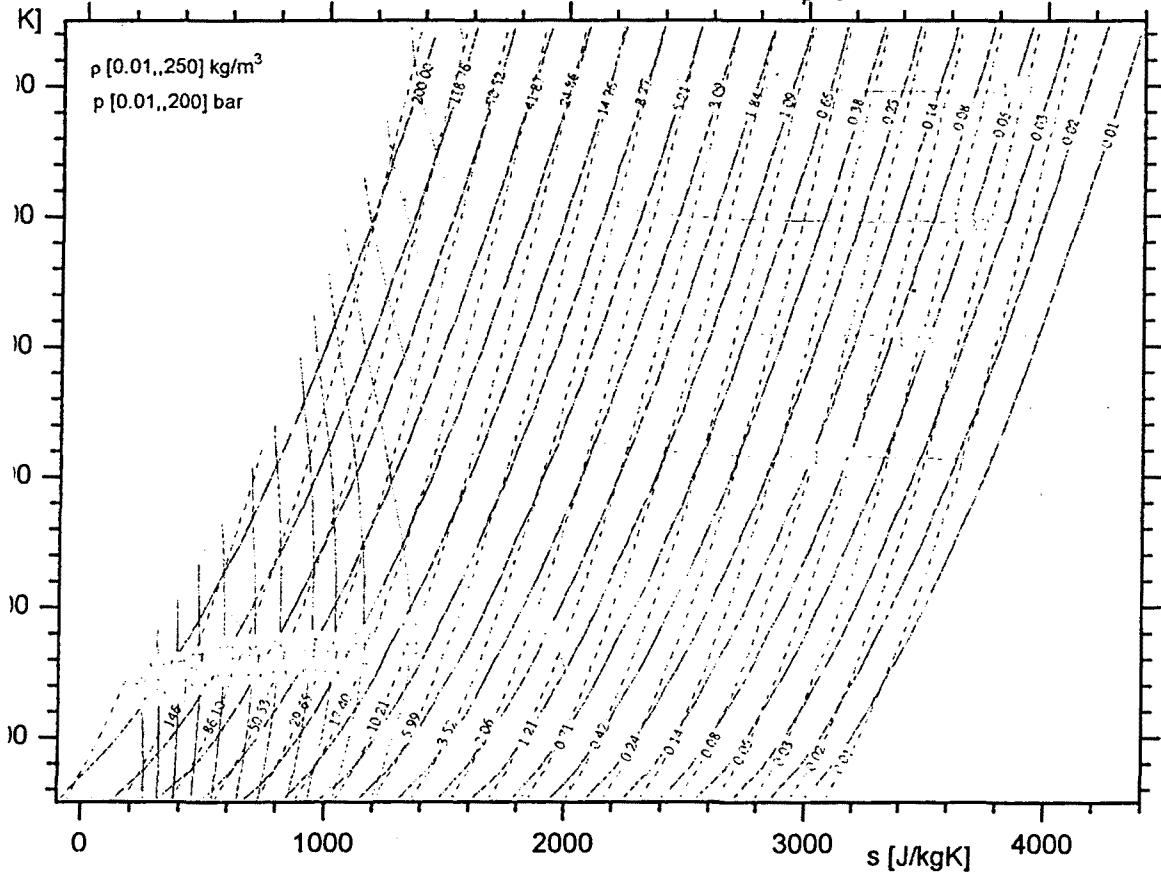
(S) de las Heras



### Razón de Calores Específicos

$$\gamma = c_p/c_v$$

(S) de las Heras



## Apéndice A2. ECUACIONES DE GAS REAL

La ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin de ocho constantes se escribe

$$p = \frac{RT}{v} + \frac{1}{v^2} \left[ RT \left\{ B_0 + \frac{b}{v} \right\} - \left\{ A_0 + \frac{a}{v} - \frac{a\alpha}{v^4} \right\} - \frac{1}{T^2} \left\{ C_0 - \frac{c}{v} \left( 1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) e^{-\gamma/v^2} \right\} \right]$$

por lo que

$$\left[ \frac{\partial p}{\partial T} \right]_v = \frac{R}{v} + \frac{1}{v^2} \left[ R \left\{ B_0 + \frac{b}{v} \right\} + \frac{2}{T^3} \left\{ C_0 - \frac{c}{v} \left( 1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) e^{-\gamma/v^2} \right\} \right]$$

y

$$z = \{p\} \frac{v}{RT} = 1 + \frac{1}{v} \left[ \left\{ B_0 + \frac{b}{v} \right\} - \frac{1}{RT} \left\{ A_0 + \frac{a}{v} - \frac{a\alpha}{v^4} \right\} - \frac{1}{RT^3} \left\{ C_0 - \frac{c}{v} \left( 1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) e^{-\gamma/v^2} \right\} \right]$$

Las constantes para el nitrógeno son

$$A_0 = 1,1925 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^3 \text{ atm}$$

$$B_0 = 0,0458 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}$$

$$C_0 = 5,886 \cdot 10^3 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^2 \text{ K}^2 \text{ atm}$$

$$a = 0,0149 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^3 \text{ atm}$$

$$b = 0,0019815 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^2$$

$$c = 548,064 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^3 \text{ K}^2 \text{ atm}$$

$$\alpha = 291,545 \cdot 10^{-6} \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^3$$

$$\gamma = 0,0075 \text{ (lmol}^{-1}\text{)}^2$$

y

$$R = 0,08207 \text{ (lmol}^{-1}\text{)} \text{ K}^{-1} \text{ atm}$$

Todas las unidades en atm, litros y grados kelvin.



La ecuación de estado de Aungier, derivada de la Redlich-Kwong, es

$$p = \frac{RT}{(v - v_c) + \frac{RT_c}{p_c + \frac{a_0}{v_c(v_c + b)}}} - \frac{a_0}{v(v + b) \left( \frac{T}{T_c} \right)^m}$$

Llamando a

$$A = \frac{RT_c}{p_c + \frac{a_0}{v_c(v_c + b)}}$$

$$B = \frac{a_0}{RT_c}$$

para simplificar las siguientes expresiones, se tiene que

$$\left[ \frac{\partial p}{\partial T} \right]_v = \frac{R}{(v - v_c) + A} + \frac{mBR}{v(v + b) \left( \frac{T}{T_c} \right)^{m+1}}$$

y que

$$z = \{p\} \frac{v}{RT} = \frac{v}{(v - v_c) + A} - \frac{B}{(v + b) \left( \frac{T}{T_c} \right)^{m+1}}$$

Los subíndices (c) indican propiedades críticas. Para el nitrógeno se tiene que

$$T_c = 126,20 \text{ K}$$

$$p_c = 33,555 \text{ atm}$$

$$v_c = 0,08921 \text{ l mol}^{-1}$$

y

$$a_0 = 0,42747 R^2 T_c p_c^{-1}$$

$$b = 0,08664 R T_c p_c^{-1}$$

$$m = 0,6$$

## Apéndice A3. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO $R_f$

Se presenta un método sencillo de estimar el coeficiente medio de rozamiento de una suspensión hidroneumática. Se admiten propiedades constantes durante la fase de calentamiento y que el ratio temporal de generación de calor por rozamiento,  $\dot{q}_f$ , es constante a lo largo del proceso.

Trabajando la suspensión a ritmo constante en el banco de pruebas<sup>2</sup>, se verifica el siguiente balance energético sobre la pared del cilindro

$$\dot{q}_f - \alpha_{amb} A_{amb} (\bar{T}_p - T_{amb}) = m_p C_p \frac{d\bar{T}_p}{dt}$$

que integrada bajo las hipótesis admitidas implica que

$$t = \int_0^t dt = \int_{T_{amb}}^{\bar{T}_p} \frac{m_p C_p}{\dot{q}_f - \alpha_{amb} A_{amb} (\bar{T}_p - T_{amb})} d\bar{T}_p = -\frac{m_p C_p}{\alpha_{amb} A_{amb}} \ln \left\{ 1 - \frac{\alpha_{amb} A_{amb}}{\dot{q}_f} (\bar{T}_p - T_{amb}) \right\}$$

o bien

$$\bar{T}_p = T_{amb} + \frac{\dot{q}_f}{\alpha_{amb} A_{amb}} \left\{ 1 - e^{-\frac{\alpha_{amb} A_{amb} t}{m_p C_p}} \right\}$$

de forma claramente asintótica, cuyo valor límite o final es

$$\bar{T}_p^\infty = T_{amb} + \frac{\dot{q}_f}{\alpha_{amb} A_{amb}}$$

y con una constante de tiempo de valor

---

<sup>2</sup> Es decir, con un movimiento de frecuencia y carrera fijas.

$$\tau_f = \frac{m_p C_p}{\alpha_{amb} A_{amb}}$$

Dado que  $\alpha_{amb}$  y  $A_{amb}$  son variables de difícil valoración, resulta más cómodo despejar el calor generado por rozamiento de entre las anteriores expresiones para obtener

$$\dot{q}_f = \frac{m_p C_p}{\tau_f} (\bar{T}_p^\infty - T_{amb})$$

donde  $m_p$ ,  $C_p$  y  $T_{amb}$  son conocidos, y  $\tau_f$  y  $\bar{T}_p^\infty$  se deducen de una curva de calentamiento experimental<sup>3</sup>.

La determinación del coeficiente de rozamiento  $R_f$  requiere suponer nuevas hipótesis. Admítase que el calor generado por rozamiento puede escribirse como

$$\dot{q}_f = R_f \{ \dot{x}_{12}^2 + \dot{x}_{32}^2 \}$$

donde  $\dot{x}_{ij}$  son las velocidades relativas entre émbolo y vástago, y entre cilindro y vástago. Como para el tipo de ensayo supuesto se cumple que ambas velocidades son funciones senoidales aparentes de la misma frecuencia y de la forma

$$\dot{x}_{ij} = 2\pi f \Delta x_{ij} \text{sen}(2\pi f t + \phi_{ij})$$

se tiene que el calor total generado en un tiempo  $t$  es

$$Q_f = \int_t \dot{q}_f dt = R_f \int_t \sum_i \{ \Delta x_{ij} \text{sen}(2\pi f t + \phi_{ij}) \}^2 (2\pi f)^2 dt \approx n R_f 2\pi^2 f \{ \Delta x_{12}^2 + \Delta x_{32}^2 \}$$

---

<sup>3</sup> Realmente el sistema resultó de primer orden.

donde  $n$  es el número de ciclos de trabajo realizados en  $t$ .

Como además resulta ser

$$n\dot{q}_f = fQ_f$$

se puede concluir que

$$R_f \approx \frac{m_p C_p}{2\pi^2 f^2 \tau_f} \frac{\bar{T}_p^\infty - T_{amb}}{\{\Delta x_{12}^2 + \Delta x_{32}^2\}}$$

o mejor aún, al ser  $\Delta x_{12}$  y  $\Delta x_{32}$  proporcionales entre sí, y  $\Delta x \equiv \Delta x_{32}$  la amplitud de la carrera de la suspensión durante el ensayo, se puede simplificar más la anterior expresión para acabar con el resultado

$$R_f \approx \frac{m_p C_p}{65 f^2 \tau_f} \frac{\bar{T}_p^\infty - T_{amb}}{\Delta x^2}$$

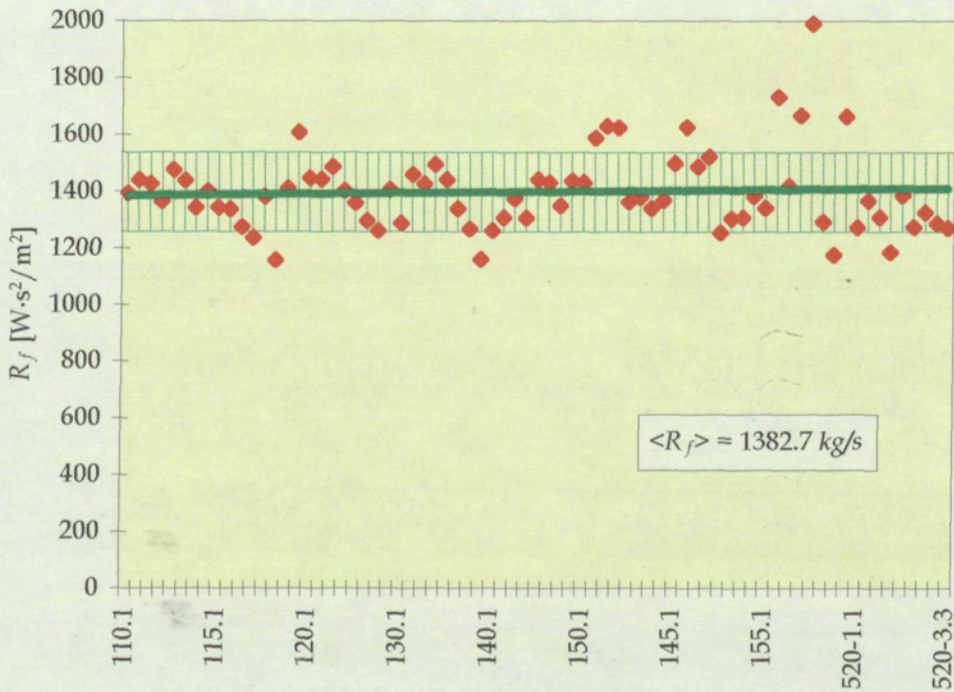


Figura A3.1. Coeficiente medio de rozamiento para las pruebas realizadas

## Apéndice A4. GENERACIÓN DE ISOTRÓPICAS

```

.
.
. Programa de preparación de datos para TECPLOT (WorkStation).
.
. Se pretende construir gráficos de isopolitrópico en T(S),plot
. según expresión determinada en TesisDoctoral (S) de las Heras.
. Se proporcionan datos en formato ASCII delimitados por comas
. de la forma:
.
. T [K], s [J/kgK], P [bar], d [kg/m³], cos, sin, n [! ]
.
. en donde cos,sin indican dirección de la isolinea correspon-
. diente al politrópico ensayado.
.
. Se utilizan correlaciones de Cv,Ga,Kt (P,T)N2. Rango de
. aplicación [-25,550]°C, [0,225]bar. En esta versión, isopoli(2),
. se discretiza el campo de presiones según la razón normal
. solicitada por teclado.
.
. Conocidas la presión y temperatura del N2 se determina su
. densidad a partir de la ecuación de Benedict-Webb-Rubin de
. 8 parámetros. Se busca la solución concreta utilizando el
. método de la bisectriz, hasta que quede garantizado que
. el método de Newton, más rápido, convergerá.
.
. Unidades SI.
.
.
. CLEAR
.
. LET TC# = 126.2
.
. LET R# = 0.08207 ' Constante g.i. del N2.
.
. LET A0# = 1.19250 ' Constantes B-W-R.
. LET B0# = 0.0458
. LET C0# = 5689.07
. LET A# = 0.0149
. LET B# = 0.00198154
. LET C# = 548.064
. LET AL# = 0.291545E-3
. LET GA# = 0.0075
.
. CLS
. PRINT "
. PRINT " Preparación datos TECPLOT para líneas de isopolitrópico"
. PRINT "
. INPUT " Indice politrópico : ",POLI#
. PRINT "
. INPUT " Presión máxima (bar): ",FMAX#
. INPUT " Presión mínima (bar): ",FMIN#
. INPUT " Temperatura máxima ( K ): ",TMAX#
. INPUT " Temperatura mínima ( K ): ",TMIN#
. PRINT "
. INPUT " Razón normal para la relación de presiones (5,10,...): ",GP#
. INPUT " Incremento de Temperatura: ",DT#
. PRINT "
. INPUT " Nombre fichero ASCII *.DAT : ",NOMFICH#
. PRINT "
.
. FMIN# = FMIN#/1.01325 'atm
. FMAX# = FMAX#/1.01325 'atm
.
. DMIN# = FNDENS#(FMIN#,TMAX#) 'mol/L
. DMAX# = FNDENS#(FMAX#,TMIN#) 'mol/L

```

```

SMIN# = FNENTR#(DMAX#,TMIN#)          'REFERencia
SMAX# = FNENTR#(DMIN#,TMAX#)          'atmL/Kmol
SMIN# = 101325*SMIN#/28               'J/kgK
SMAX# = 101325*SMAX#/28               'J/kgK

OPEN NOMFICH# FOR OUTPUT AS #1

T# = TMIN#
WHILE T#<=TMAX#
  P# = FMIN#
  DO
    D# = FNDENS#(P#,T#)
    S# = 101325*FNENTR#(D#,T#)/28
    IF (S#>=SMIN#) AND (S#<=SMAX#) THEN
      J# = FNJOTA#(P#,T#)              'dT/ds [K/(J/kgK)]
      JSIN# = SIN(ATN(J#))
      JCOS# = COS(ATN(J#))
      PRINT USING "###.#### "; T#;
      PRINT USING "#####.## "; S#;
      PRINT USING "###.#### "; 1.01325*P#;
      PRINT USING "###.#### "; 28*D#;
      PRINT USING "##.##### "; JCOS#;
      PRINT USING "##.##### "; JSIN#;
      PRINT USING "+##.## "; POLI#;
      PRINT USING "#####.####";180*ATN(J#)/3.14159
      PRINT #1, USING "###.####_", "; T#;
      PRINT #1, USING "#####.##_", "; S#;
      PRINT #1, USING "###.####_", "; 1.01325*P#;
      PRINT #1, USING "###.####_", "; 28*D#;
      PRINT #1, USING "##.#####_", "; JCOS#;
      PRINT #1, USING "##.#####_", "; JSIN#;
      PRINT #1, USING "+##.##"; POLI#
    END IF
    P# = 10**(1/GP#)*P#
    LOOP UNTIL P#>PMAX#
    T# = T# + DT#
  WEND
CLOSE 1

PRINT "
PRINT "Jaeta!"
END

DEF FNDENS#(P#,T#)
' Cálculo de la densidad correspondiente a P,T según B-W-R
' Método de la bisectriz.

D1# = P#/(R#*T#)          ' Estimación inicial.
D2# = 1.1*D1#             ' Valores extremos. La E.I. es
D1# = 0.9*D1#             ' suficientemente buena.

DO WHILE ABS(FNFUN#( (D1#+D2#)/2,T#,P# )) > 0.01
  DELTA# = D2# - D1#
  D1# = D1# + DELTA#/2
  IF ( FNFUN#(D1#,T#,P#)*FNFUN#(D2#,T#,P#) ) > 0 THEN
    D1# = D1# - DELTA#/2
    D2# = D2# - DELTA#/2
  END IF
LOOP

' Método de Newton.
D# = (D2# + D1#)/2
G# = D# - FNFUN#(D#,T#,P#)/FNDER#(D#,T#)

DO WHILE ABS( 1-(D#/G#) ) > 1E-10
  D# = G#
  G# = D# - FNFUN#(D#,T#,P#)/FNDER#(D#,T#)
LOOP

' Exit from FNDENS#
FNDENS# = G#
END DEF

```

```

DEF FNFUN#(D#,T#,F#)
  BWR1# = A##AL#
  BWR2# = C##GA##EXP(-GA##D##^2)/(T##^2)
  BWR3# = B##R##T##-A##+BWR2#/GA#
  BWR4# = B0##R##T##-A0##-C0#/T##^2
  F# = BWR1##D##^6 + BWR2##D##^5 + BWR3##D##^3
  FNFUN# = F# + BWR4##D##^2 + R##T##D# - F#
END DEF

DEF FNDER#(D#,T#)
  BWR1# = A##AL#
  BWR2# = C##GA##EXP(-GA##D##^2)/(T##^2)
  BWR3# = B##R##T##-A##+BWR2#/GA#
  BWR4# = B0##R##T##-A0##-C0#/T##^2
  F# = -2*GA##BWR2##D##^6 + 6*BWR1##D##^5 + 3*BWR2##D##^2
  FNDER# = F# + 3*BWR3##D##^2+2*BWR4##D##+R##T#
END DEF

DEF FNENTR#(D#,T#) 'mol/L,K
  TR# = T#/TC#
  TRMIN# = TMIN#/TC#
  CV# = 0.774988-0.0309433*TR#+0.00793409*TR##^2
  CVMIN# = 0.774988-0.0309433*TRMIN#+0.00793409*TRMIN##^2
  CVON2# = 0.5*(CV#+CVMIN#)*28000/101325

  BWR50# = CVON2##LOG(T#/TMIN#)+R##LOG(DMAX#/D#)

  BWR52# = R##B0##+2*C0#/T##^3
  BWR53# = B##R##/2
  BWR54# = (1-EXP(-GA##D##^2))/(GA##D##^2)-0.5*EXP(-GA##D##^2)
  BWR55# = 2*C##BWR54#/T##^3
  FNENTR# = BWR50##D##+BWR52##*(D##^2)*(BWR55##-BWR53#)
END DEF

DEF FNJOTA#(F#,T#)
  TR# = T#/TC#
  PJ# = 0.101325*F#

  CV0# = 0.774988-0.0309433*TR#+0.00793409*TR##^2-0.000294845*TR##^3
  CV1# = 0.0120795*TR##^(-1.81261)
  CV2# = 0.000382675*TR##^(-2.85939)
  CVN2# = 1000*(CV0#+CV1##PJ##-CV2##PJ##^2) 'J/ g/K

  GA0# = 1.33086+0.0563388*TR##-0.0139935*TR##^2+0.000918346*TR##^3
  GA1# = 0.220606*TR##^(-2.81029)
  GA2# = 0.00510423*TR##^(-3.35663)
  GAN2# = GA0#+GA1##PJ##-GA2##PJ##^2 '[]

  IF TR#<4.0 THEN
    KT1# = -0.155765+0.138321*TR##-0.0403538*TR##^2+0.00395199*TR##^3
  ELSE
    KT1# = 0.00478556
  END IF

  KT2# = 0.0106697*TR##^(-3.35693)
  KTN2# = 1.0 +KT1##PJ##+KT2##PJ##^2 '[]

  NUMER# = POLI##-GAN2##KTN2#
  DENOM# = POLI##-KTN2#

  FNJOTA# = (T##DENOM#)/(CVN2##NUMER#) '1/j=dT/ds
END DEF

```

## Apéndice A5. COTEJO DE RESULTADOS

A continuación se muestra una selección de gráficos de las pruebas realizadas en esta Tesis Doctoral.

La simulación por ordenador se forzó para que las carreras de suspensión coincidieran entre modelo y ensayo. Obsérvese como la coherencia de las curvas de presión e índice politrópico se excelente en la mayoría de casos. El flujo másico se representa sólo con fines informativos.

Todos los gráficos corresponden a estados estacionarios.

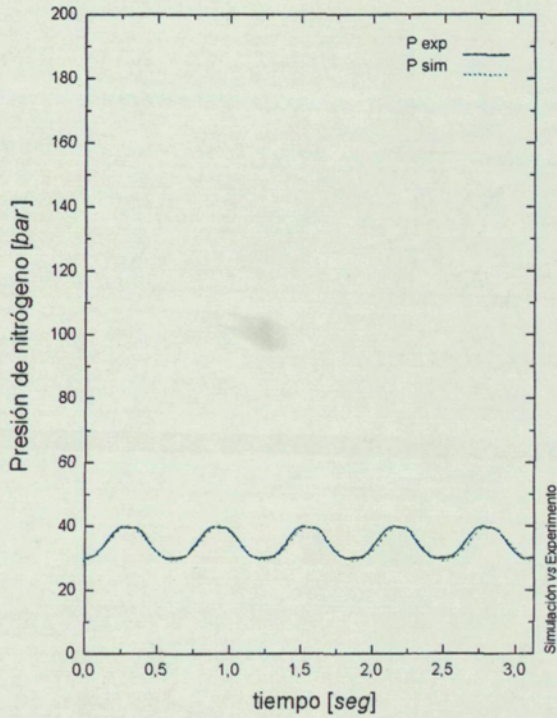


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

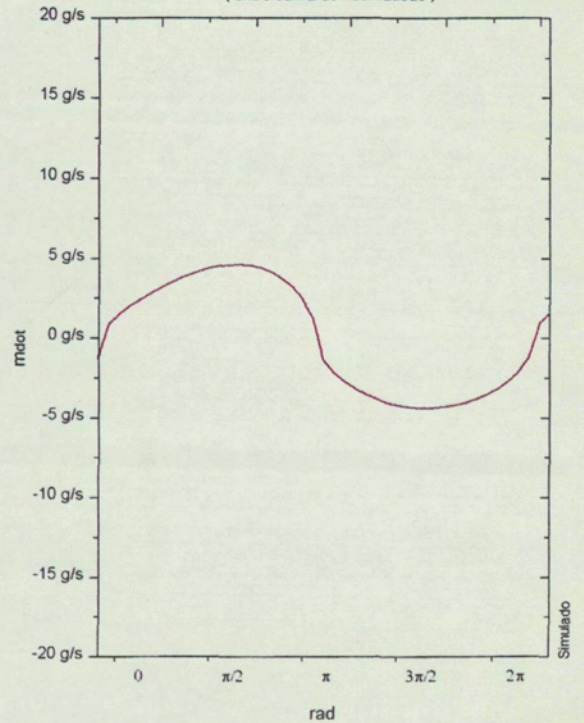
Pruebas experimentales 150\_1 realizadas el 941130 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

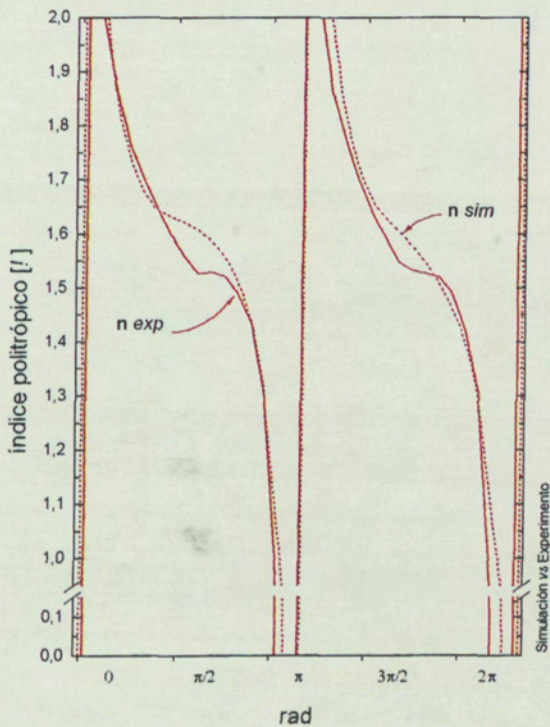


flujo másico

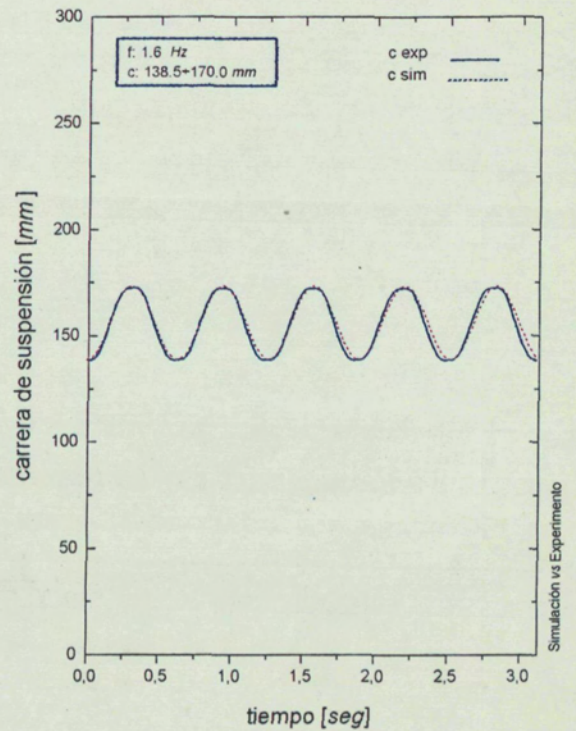
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

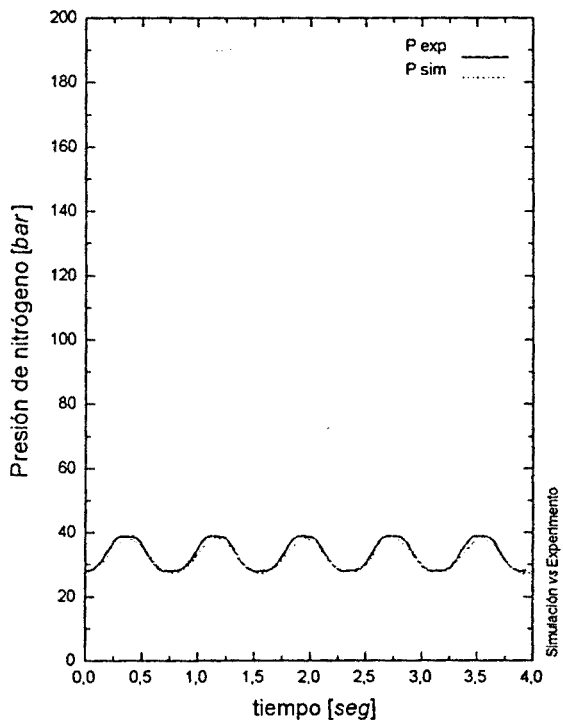


# Cotejo de Resultados

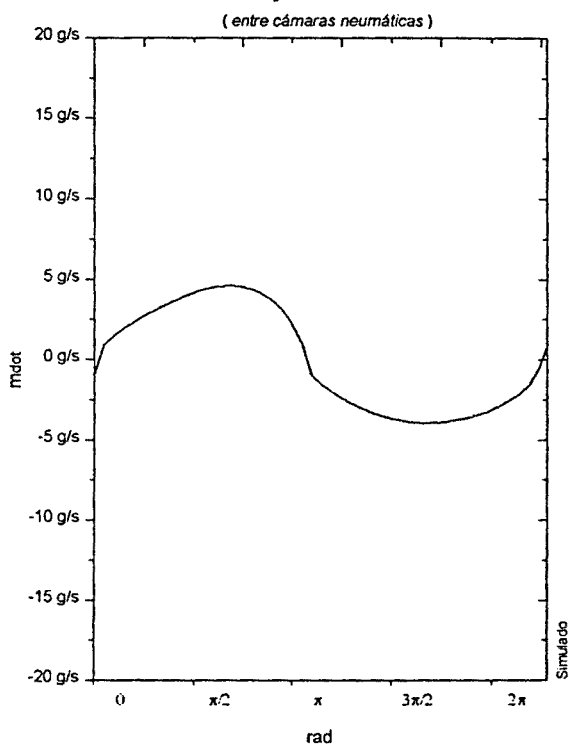
(S) de las Heras & FMS

Pruebas experimentales 150\_2 realizadas el 941201 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.I.I. de Terrassa.

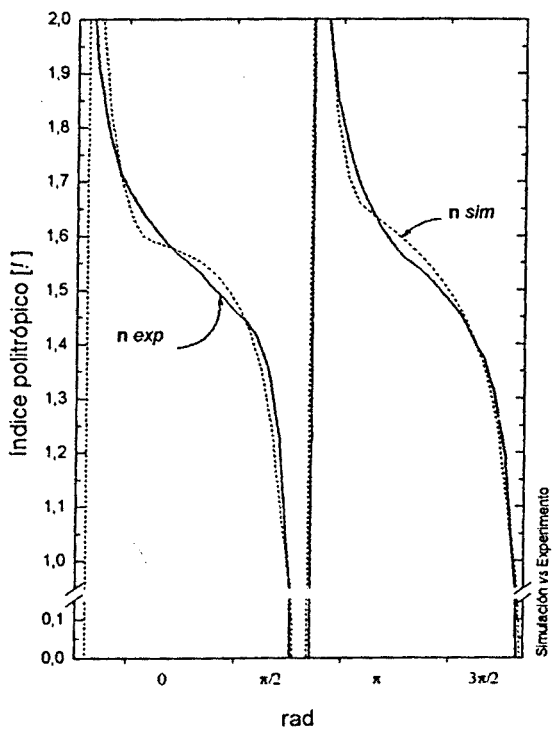
presión de nitrógeno



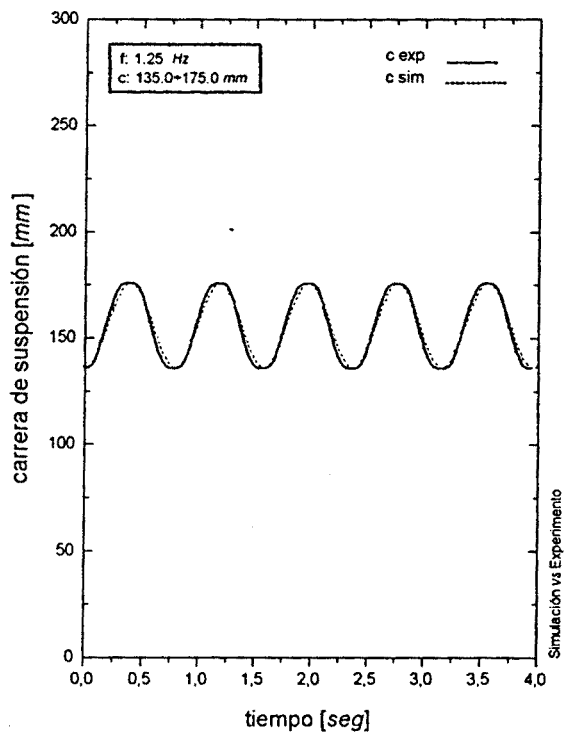
flujo másico



índice politrópico



carrera de suspensión

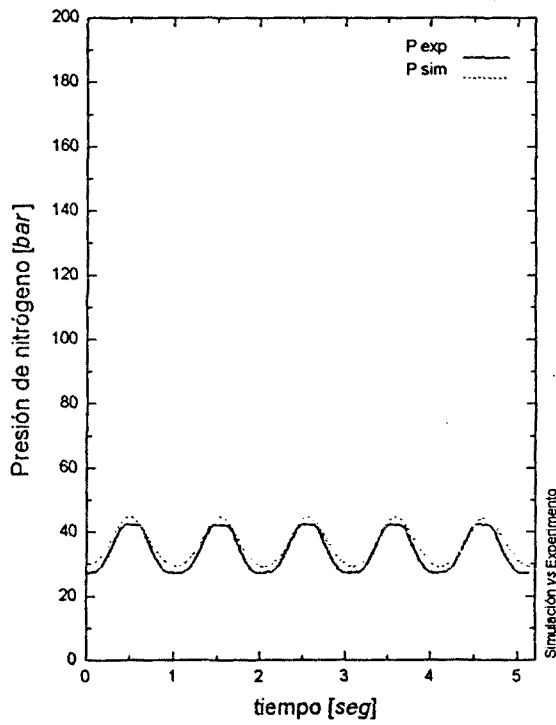


## Cotejo de Resultados

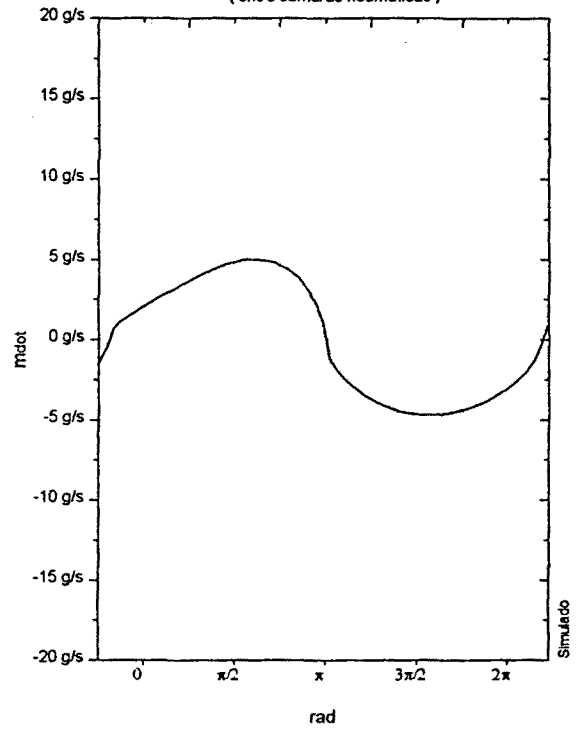
(S) de las Heras & FMS

Pruebas experimentales 150\_3 realizadas el 941201 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

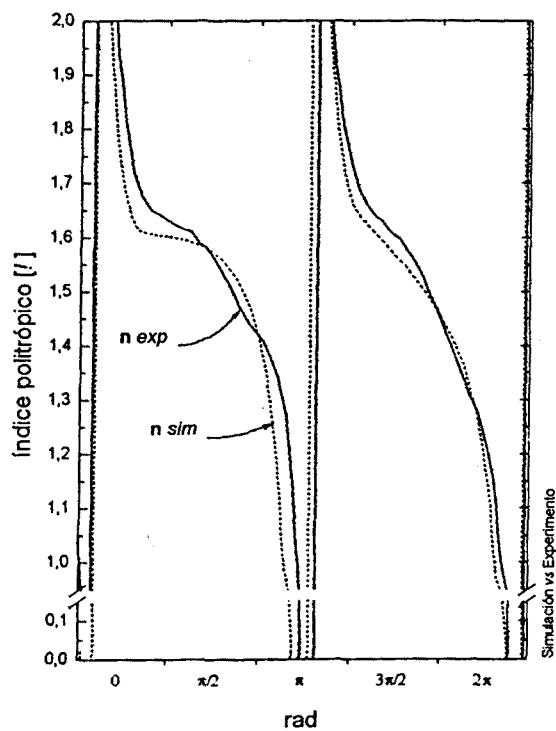
presión de nitrógeno



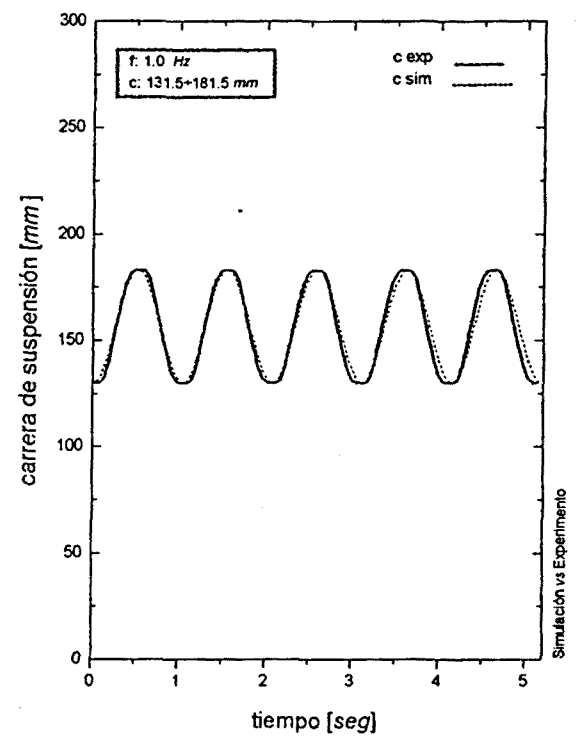
flujo másico  
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

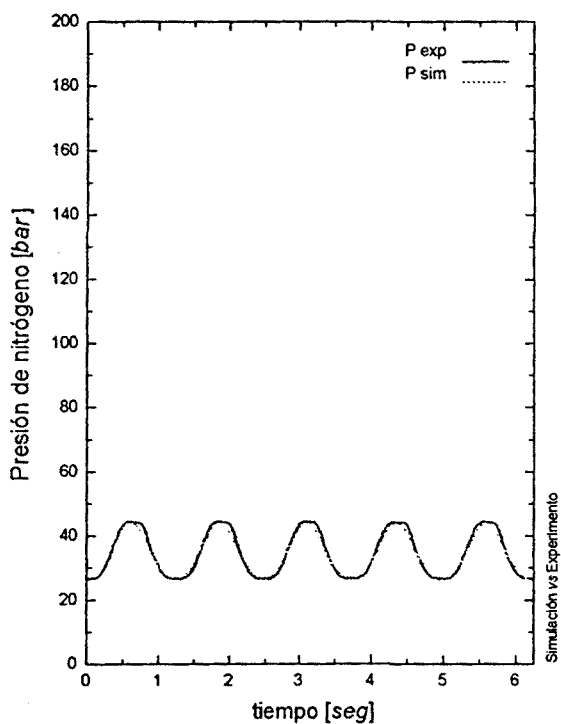


## Cotejo de Resultados

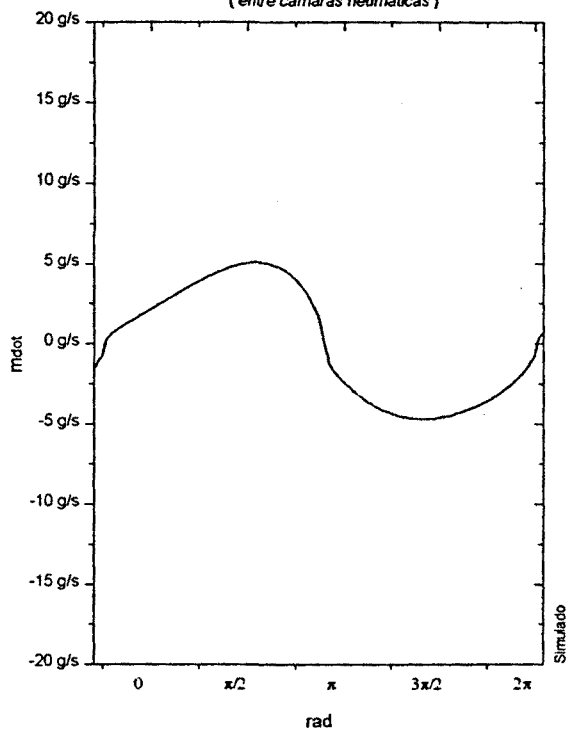
(S) de las Heras & FMS

Pruebas experimentales 150\_4 realizadas el 9/4/201 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

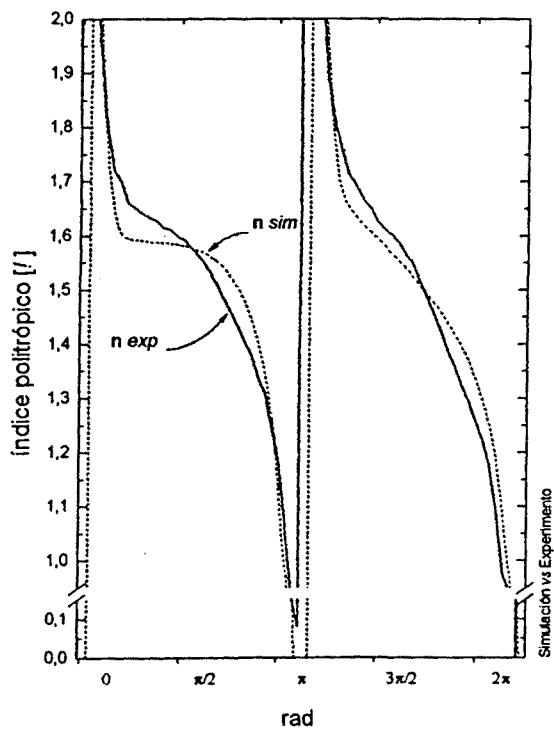
presión de nitrógeno



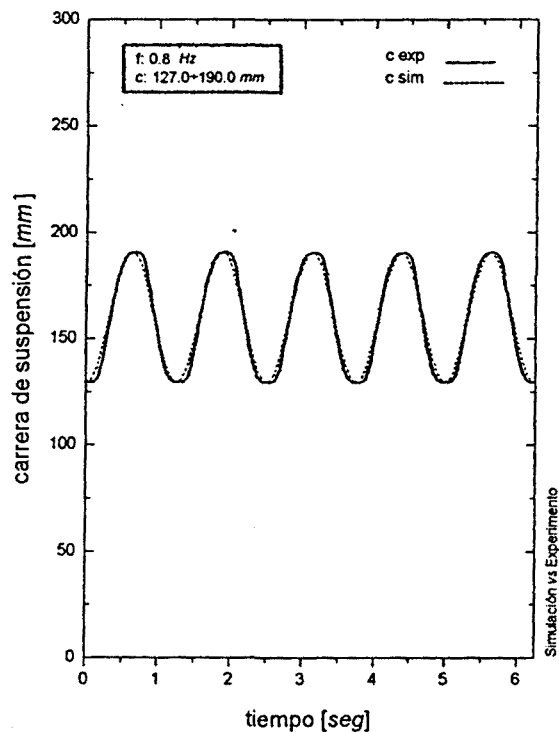
flujo másico  
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico

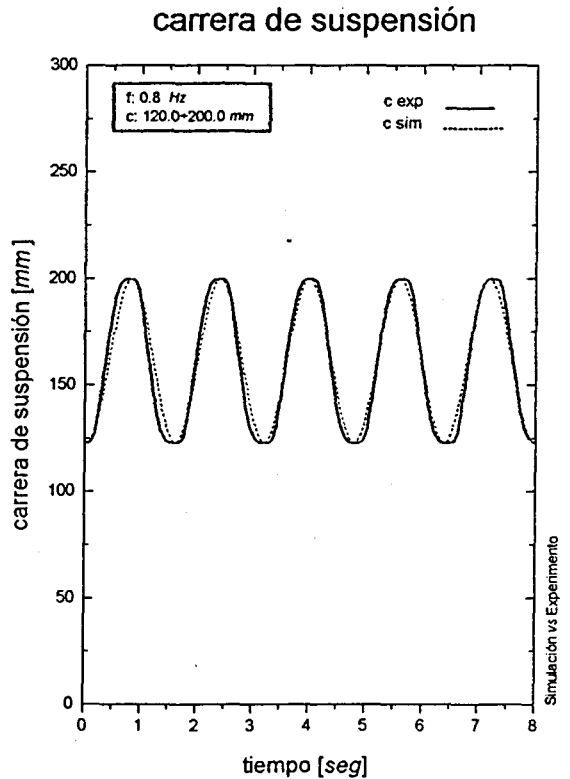
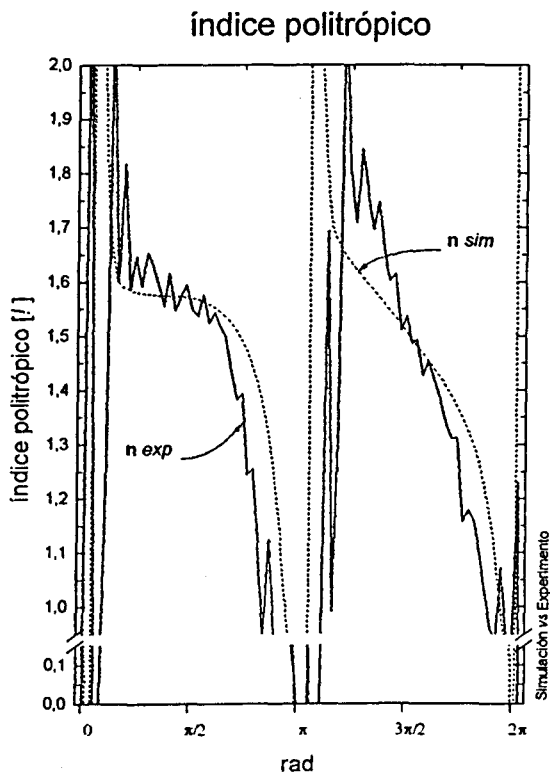
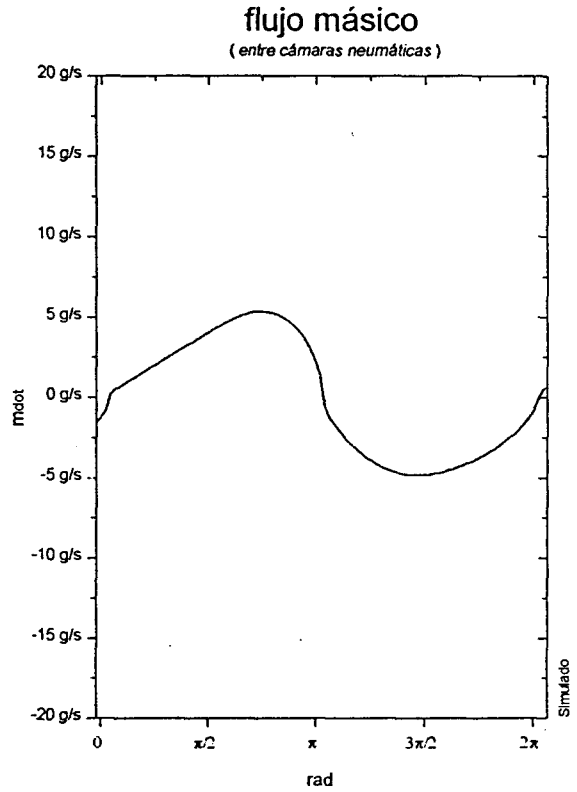
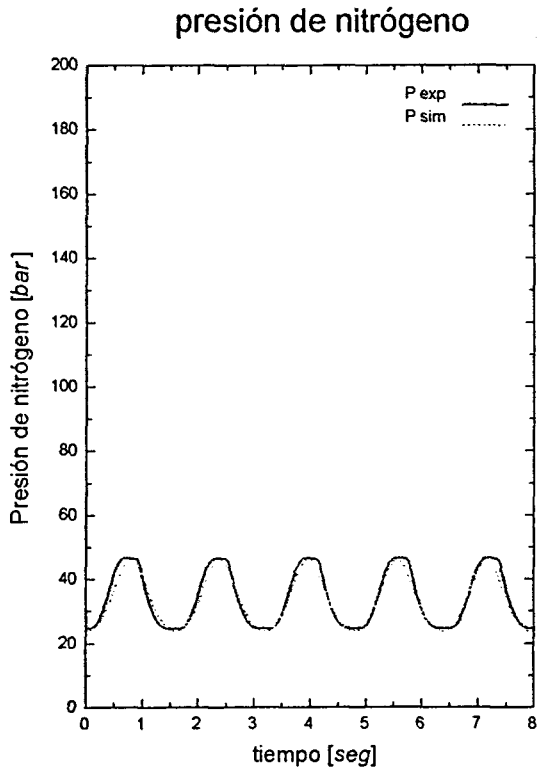


carrera de suspensión



# Cotejo de Resultados

Pruebas experimentales 150\_5 realizadas el 941202 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa. (S) de las Heras & FMS

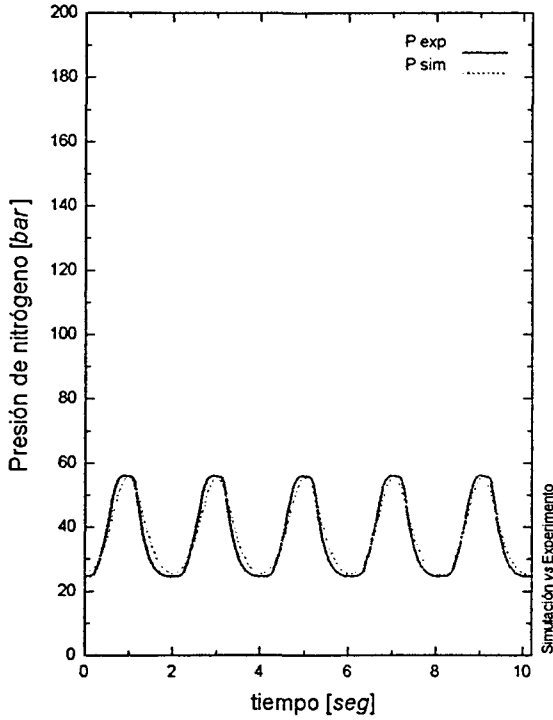


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

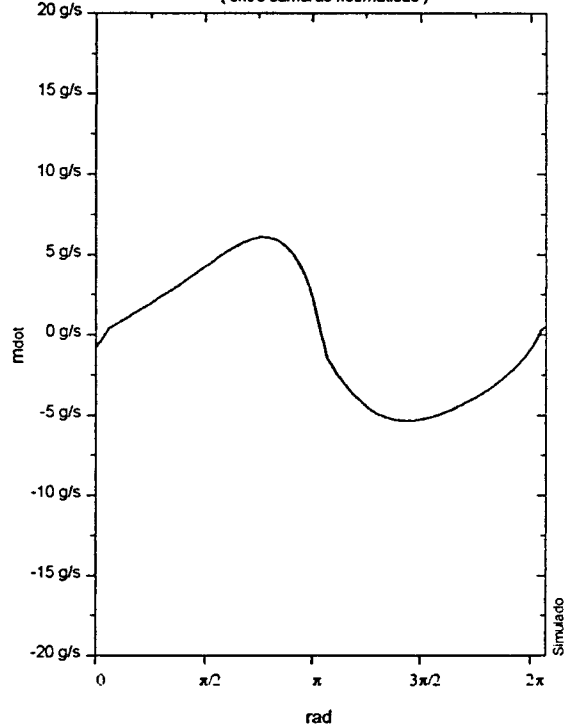
Pruebas experimentales 150\_6 realizadas el 941202 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

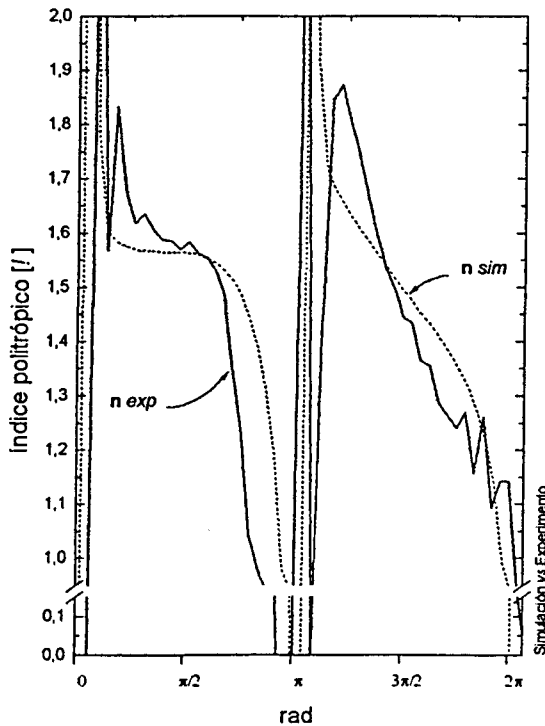


flujo másico

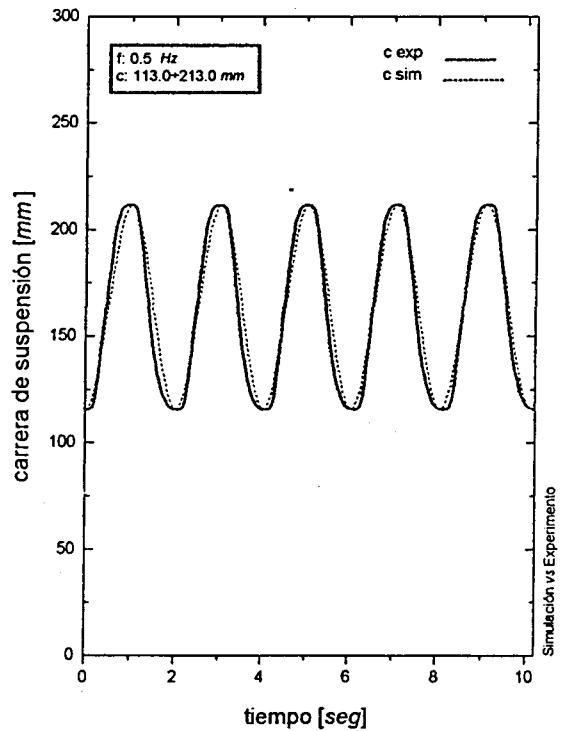
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

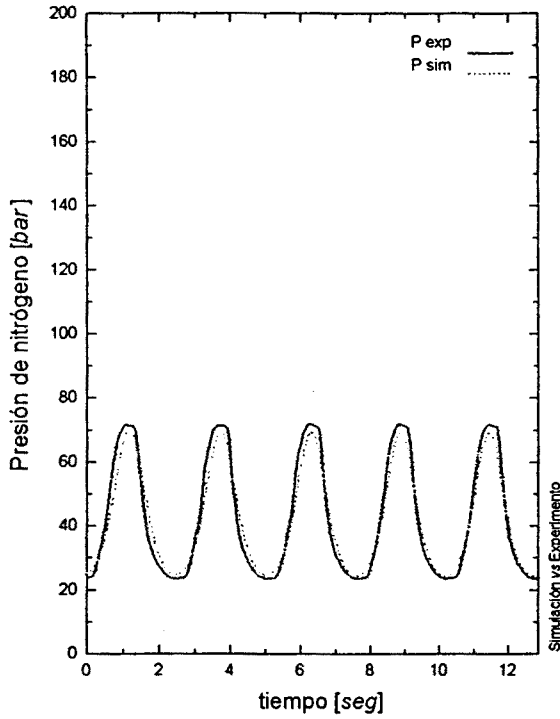


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

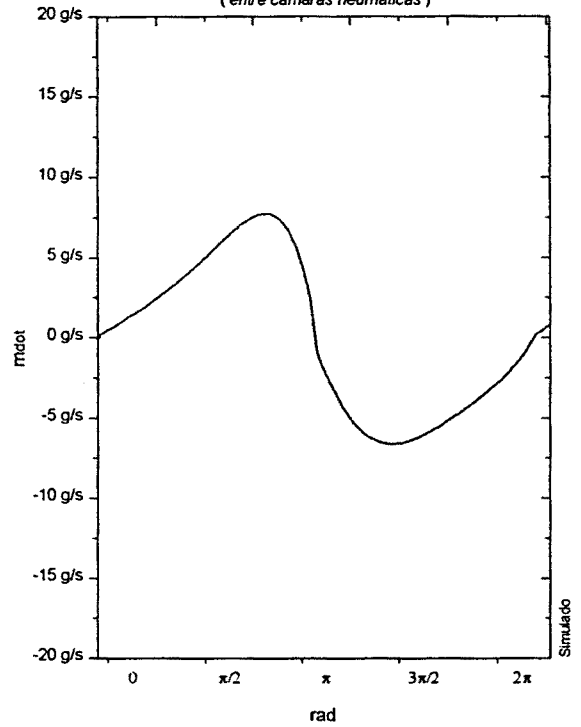
Pruebas experimentales 150\_7 realizadas el 941202 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

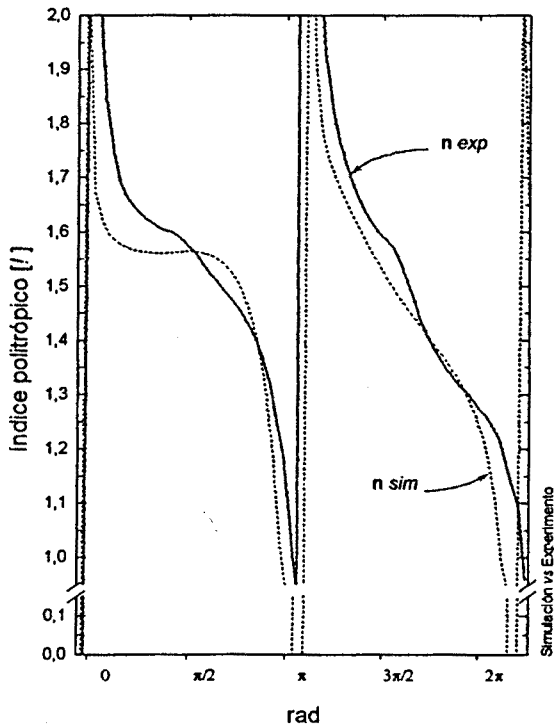


flujo másico

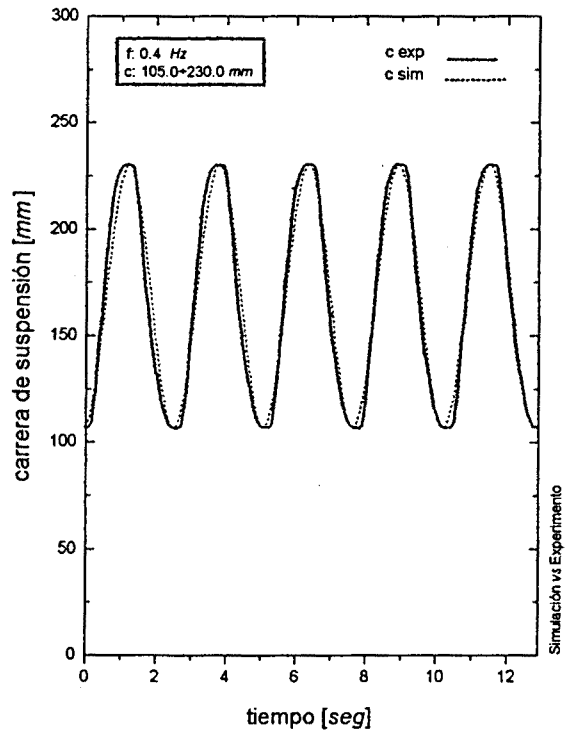
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

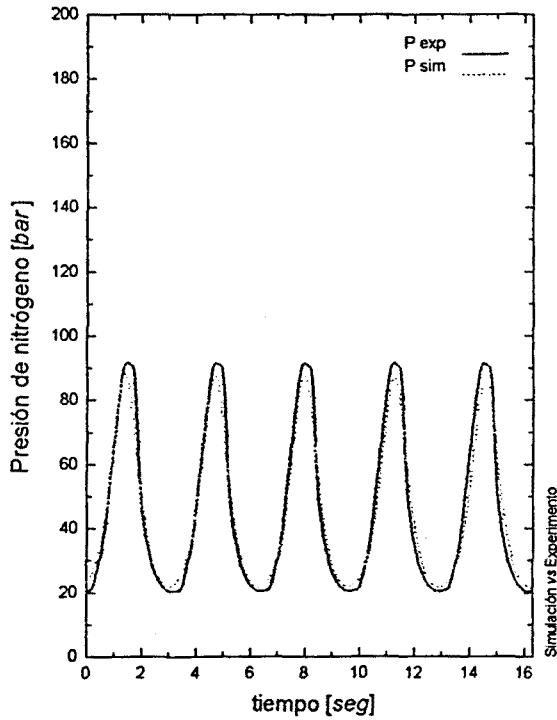


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

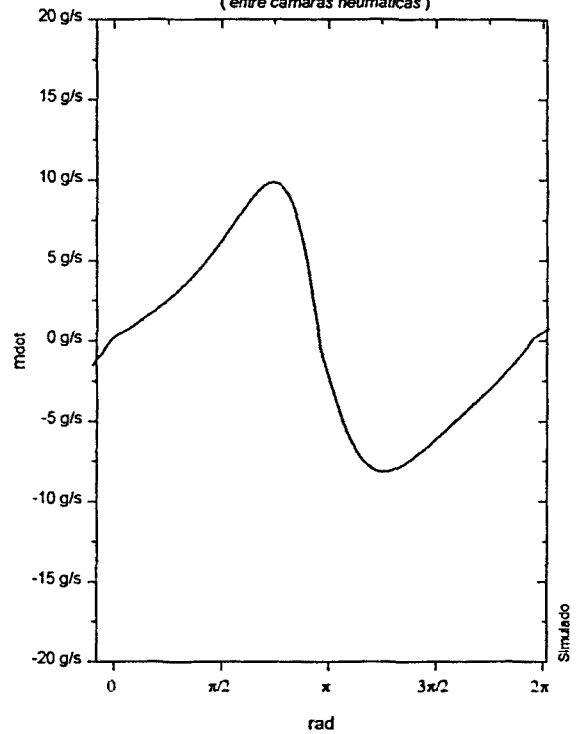
Pruebas experimentales 150\_8 realizadas el 941212 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

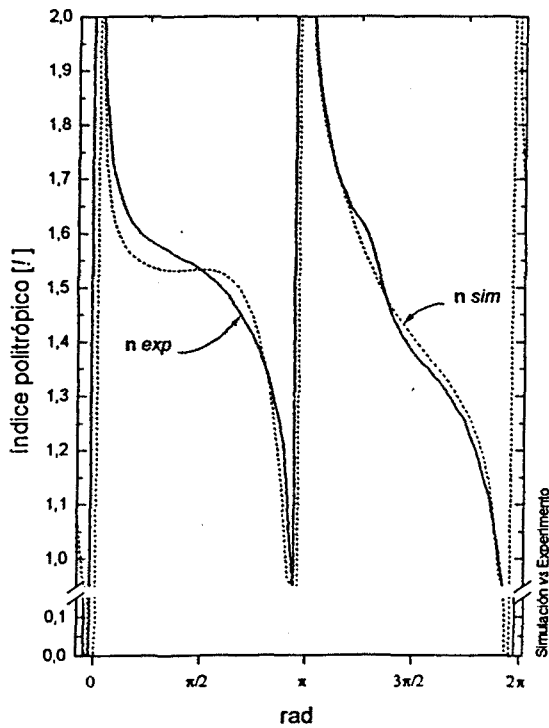


flujo másico

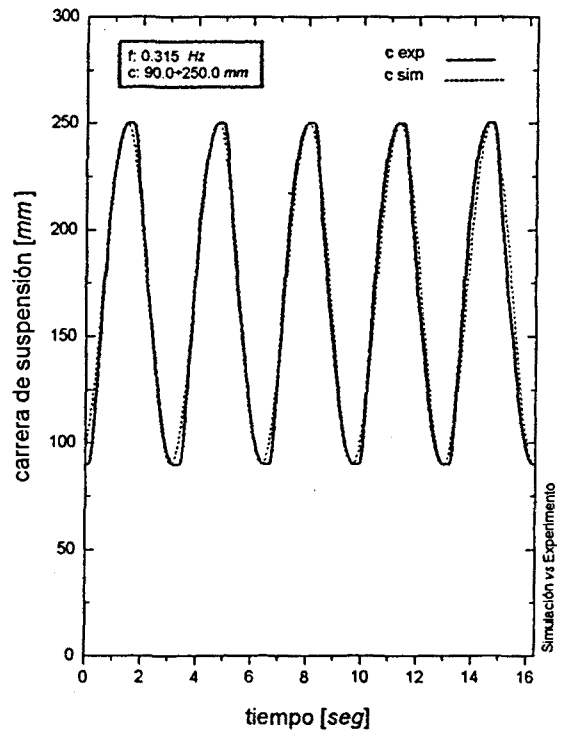
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



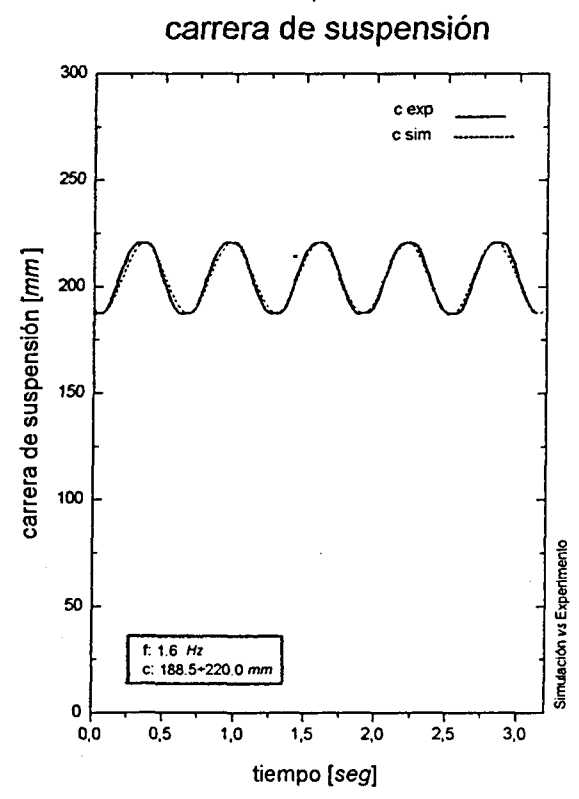
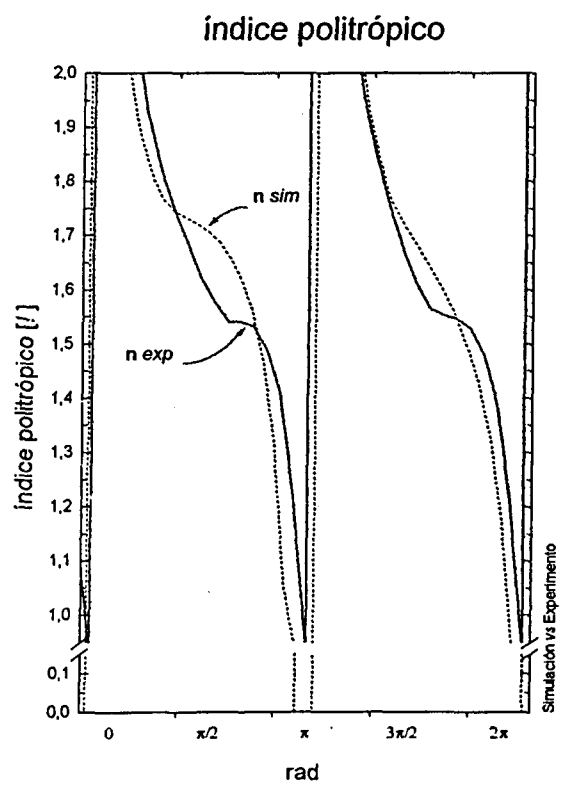
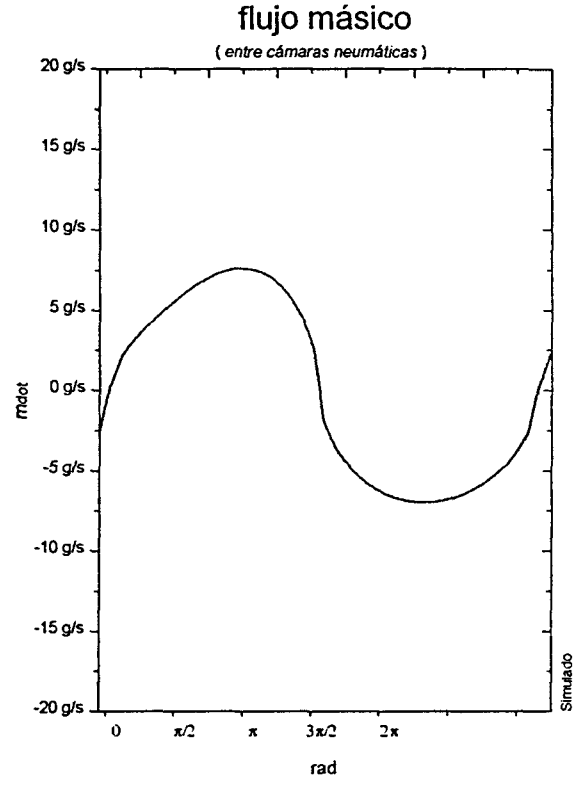
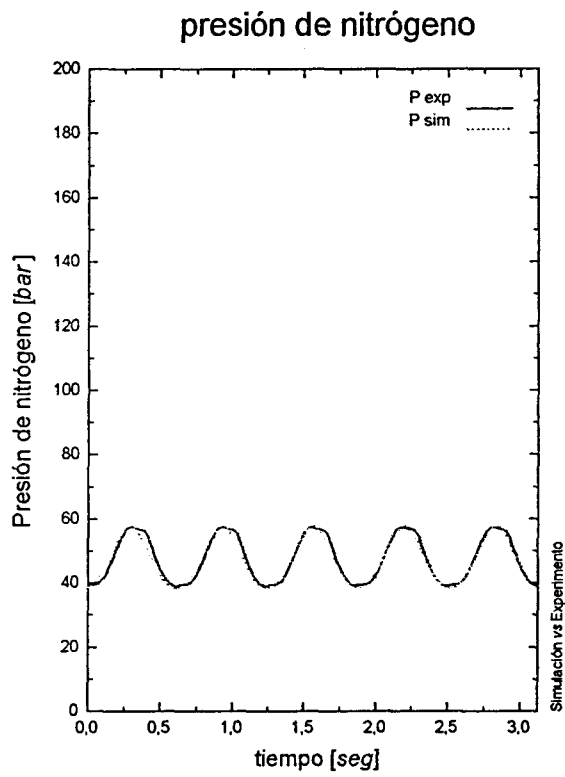
carrera de suspensión





# Cotejo de Resultados

Pruebas experimentales 155\_1 realizadas el 941205 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa. (S) de las Heras & FMS

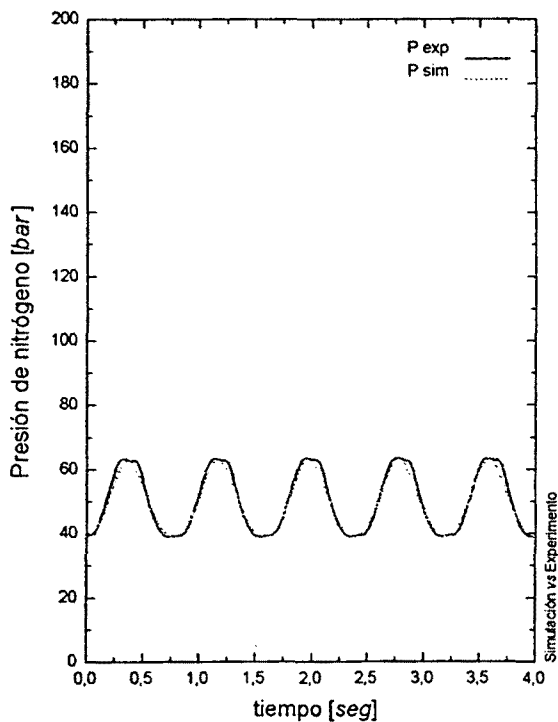


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

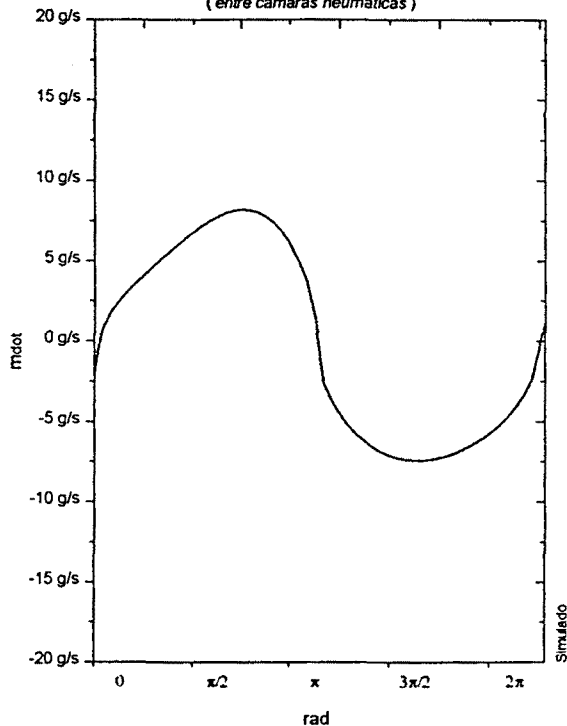
Pruebas experimentales 155\_2 realizadas el 941205 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

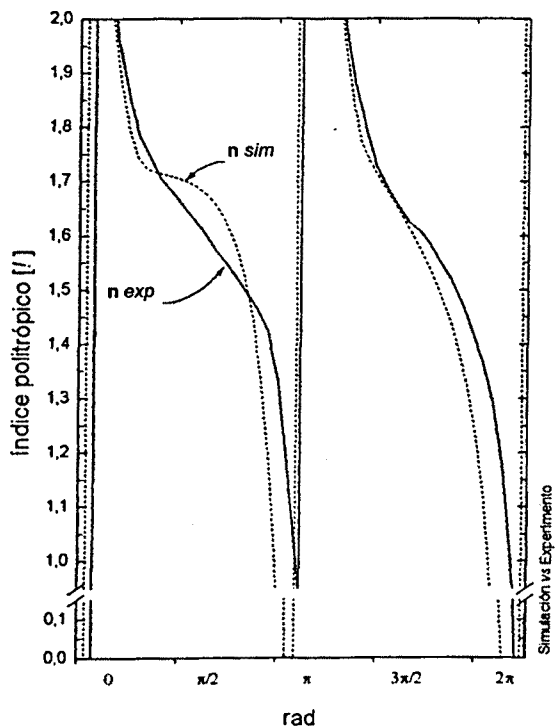


flujo másico

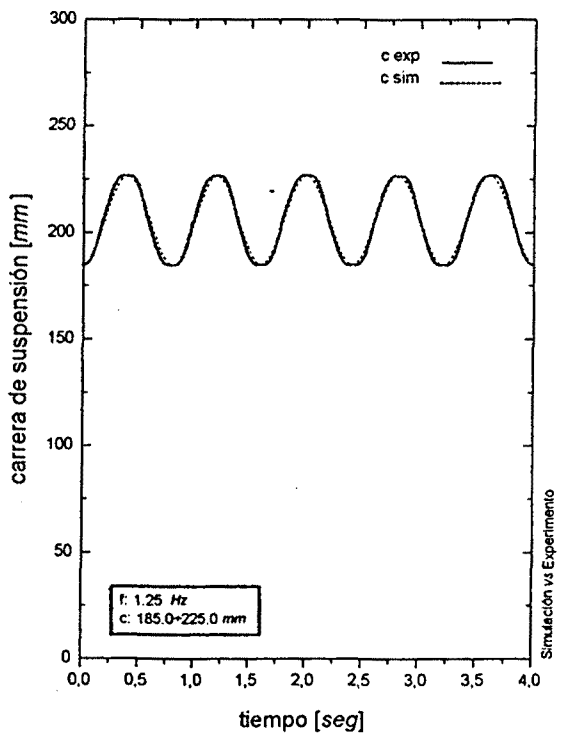
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

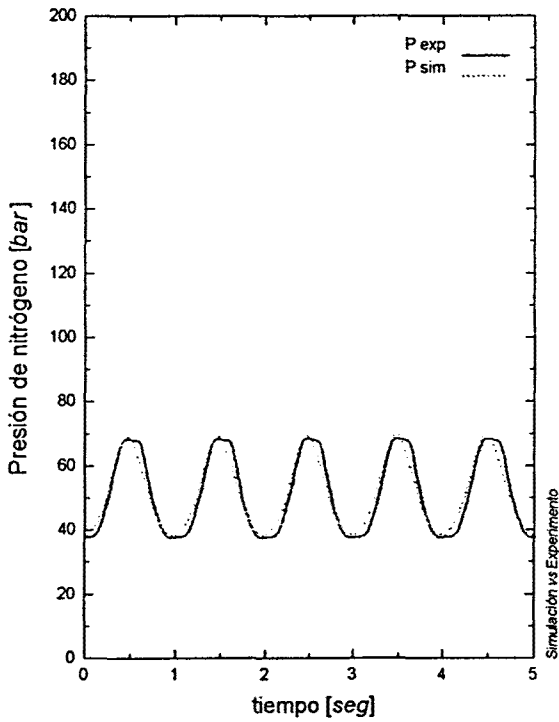


## Cotejo de Resultados

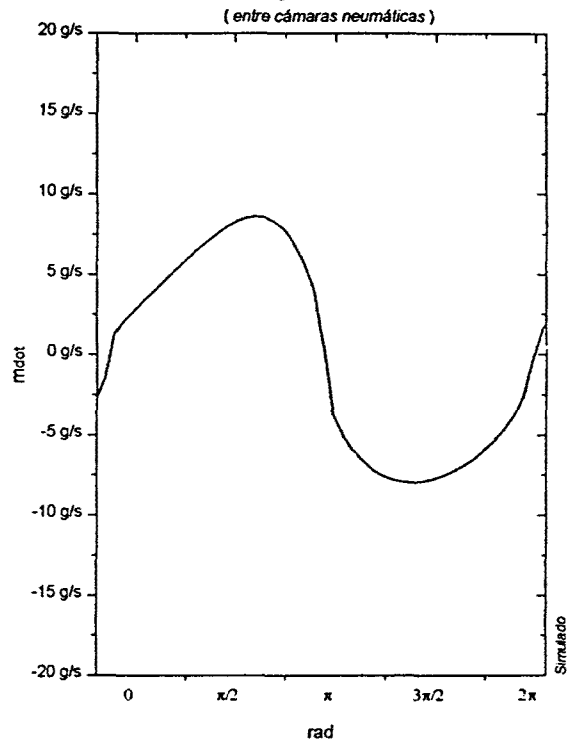
(S) de las Heras & FMS

Pruebas experimentales 155\_3 realizadas el 941205 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

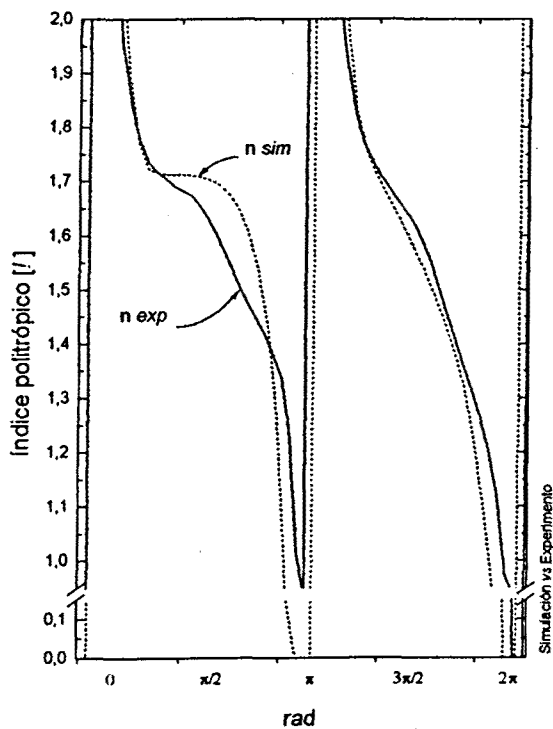
presión de nitrógeno



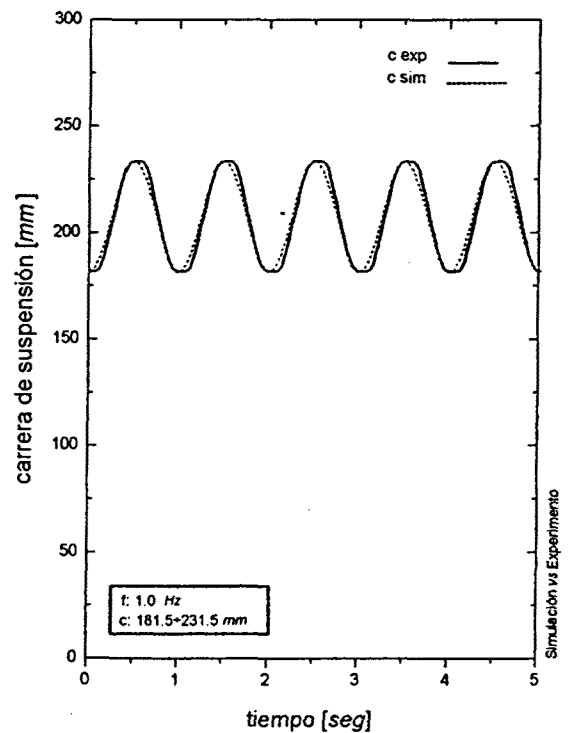
flujo másico



índice politrópico



carrera de suspensión

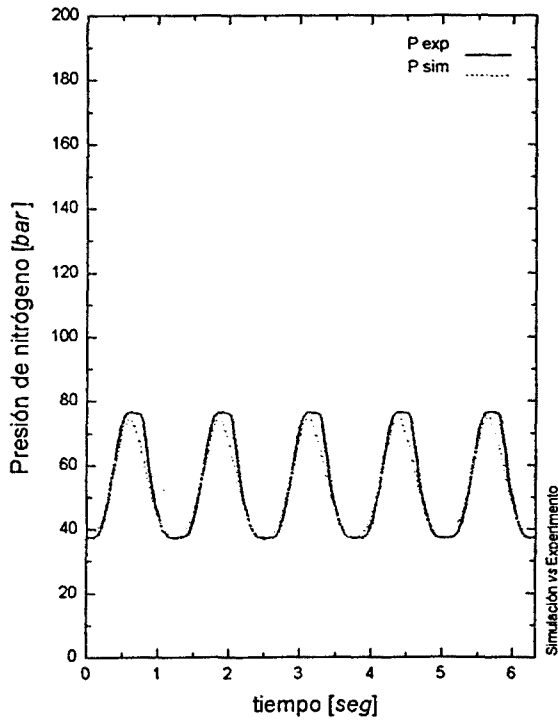


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

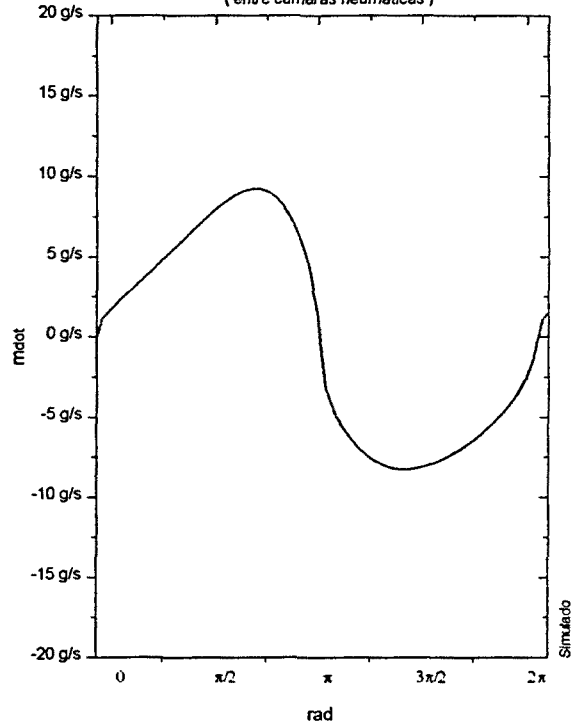
Pruebas experimentales 155\_4 realizadas el 941205 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

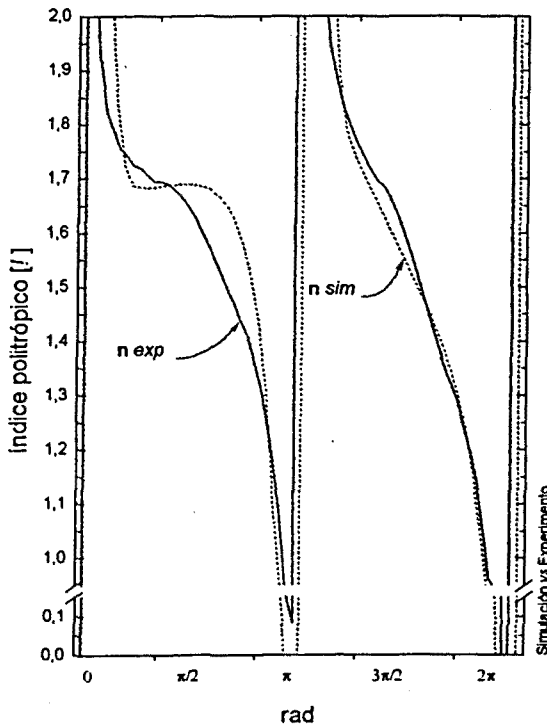


flujo másico

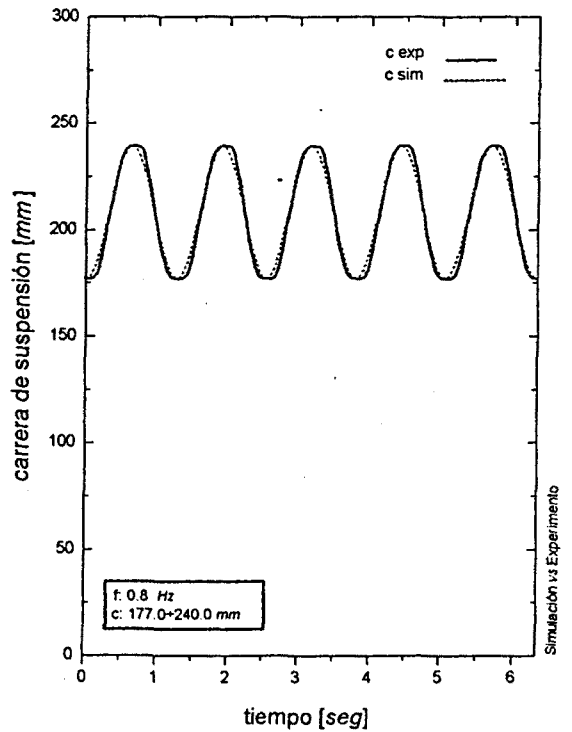
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

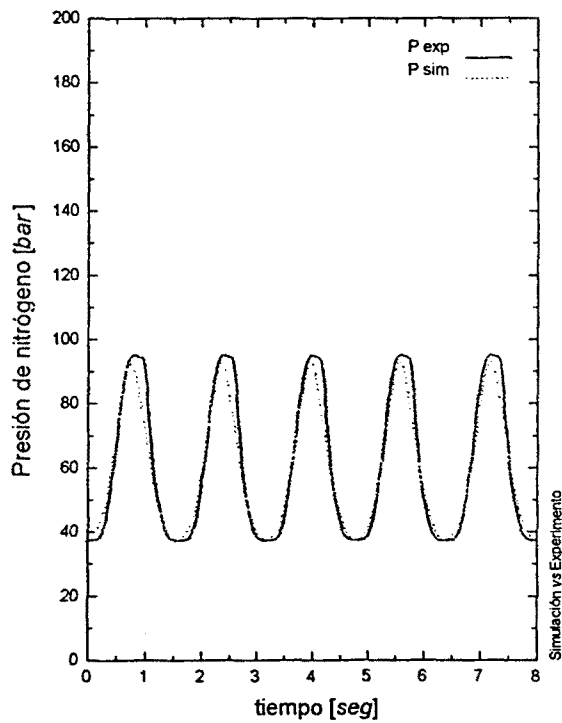


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

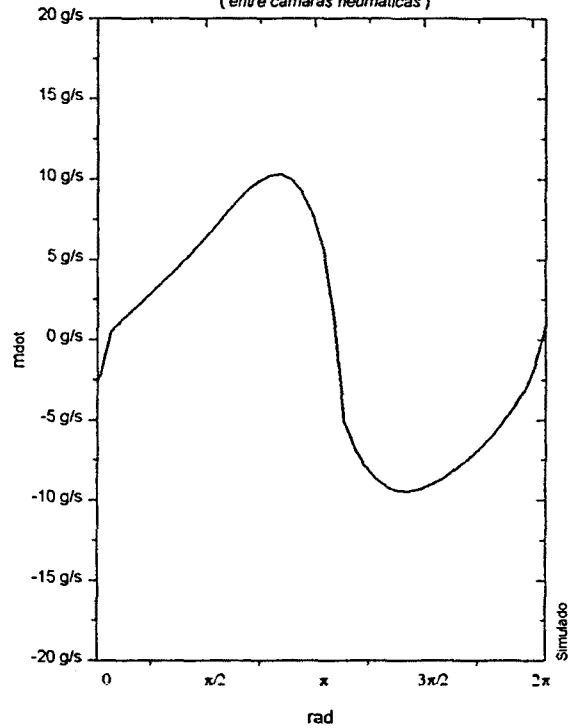
Pruebas experimentales 155\_5 realizadas el 941205 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

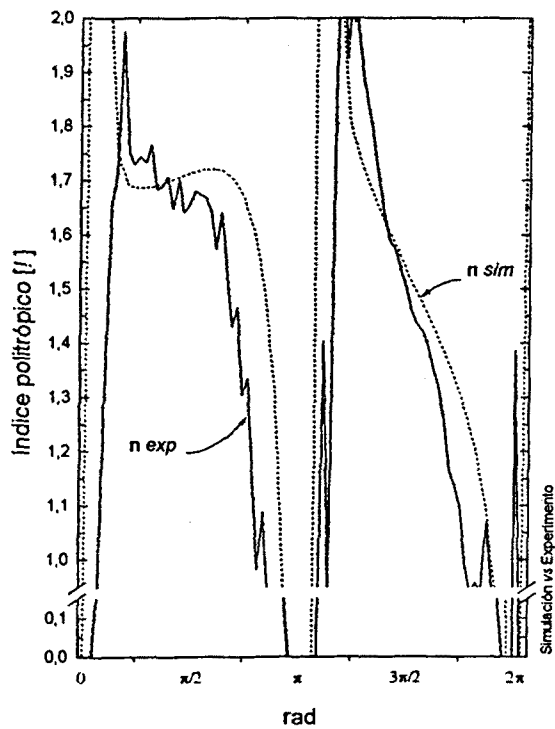


flujo másico

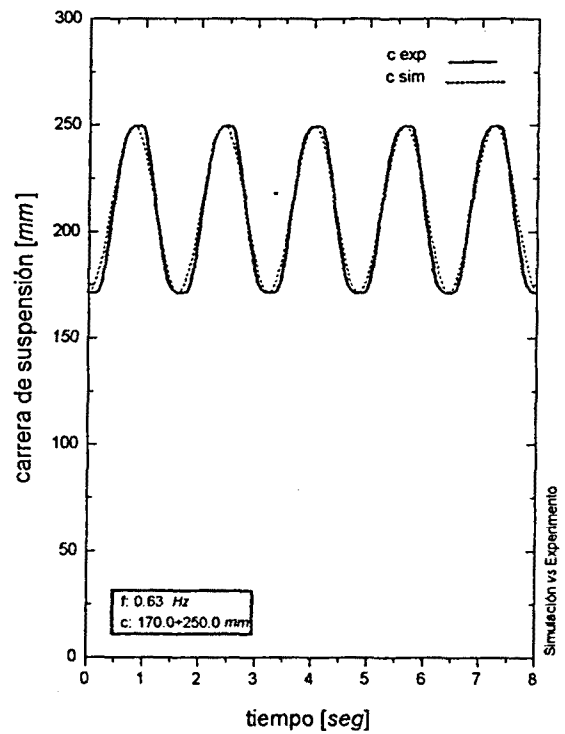
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



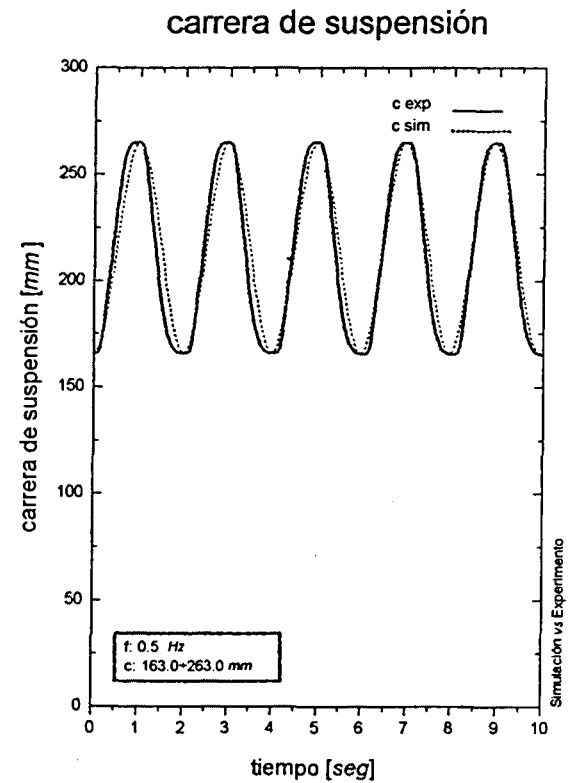
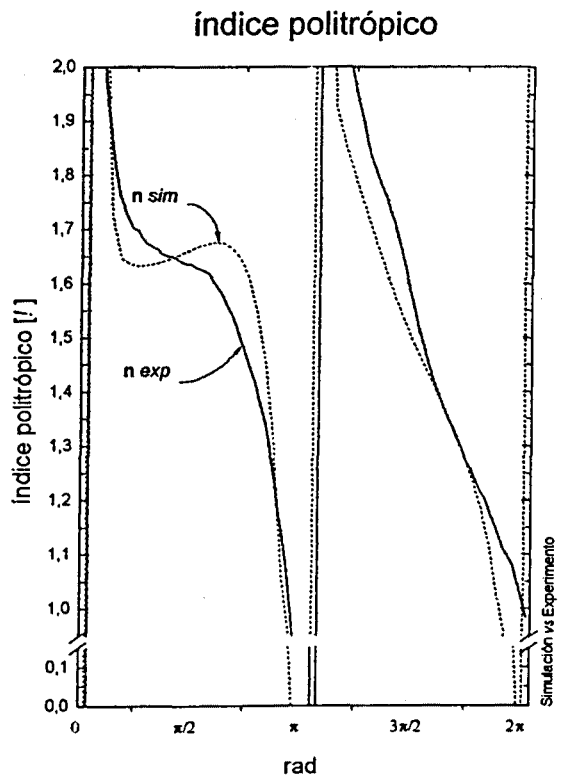
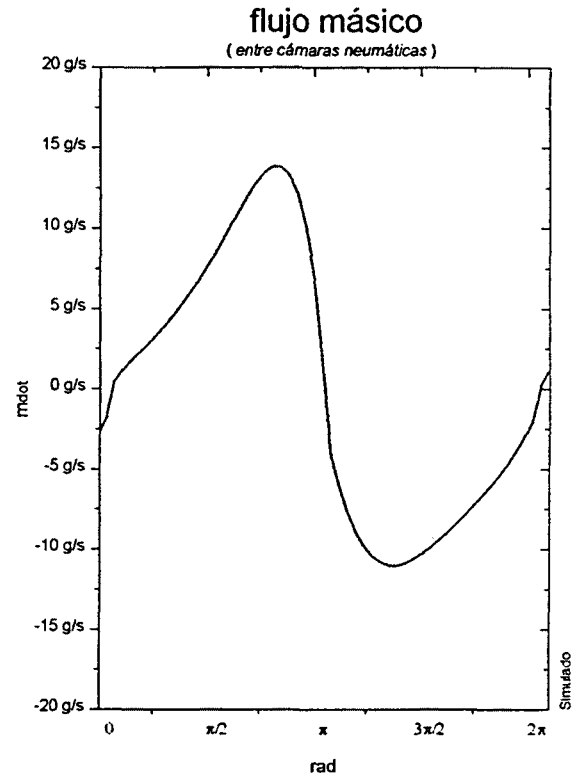
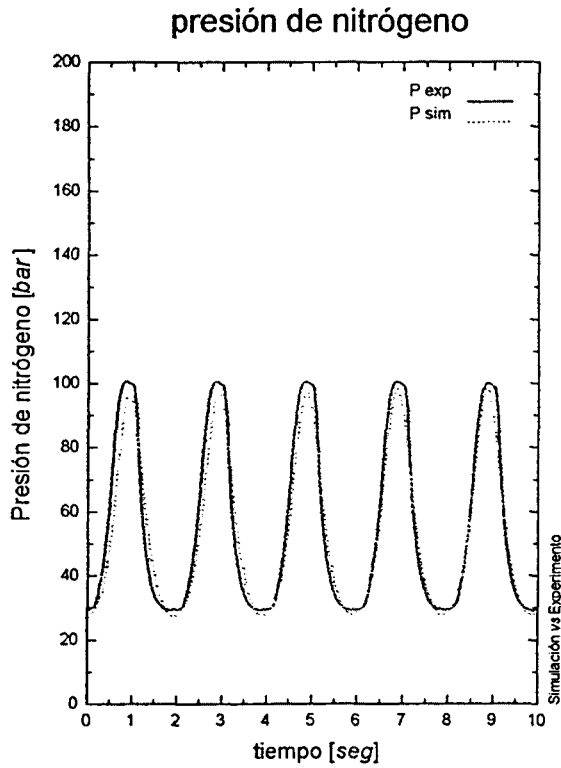
carrera de suspensión



# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

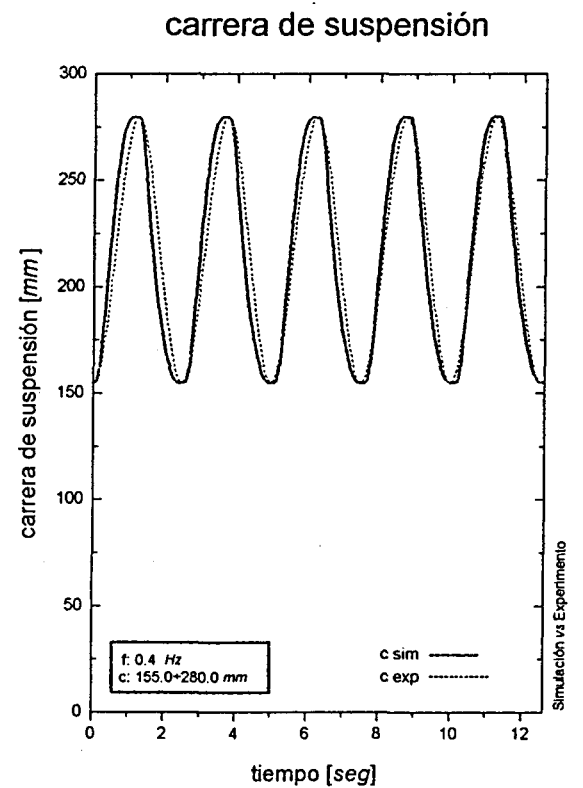
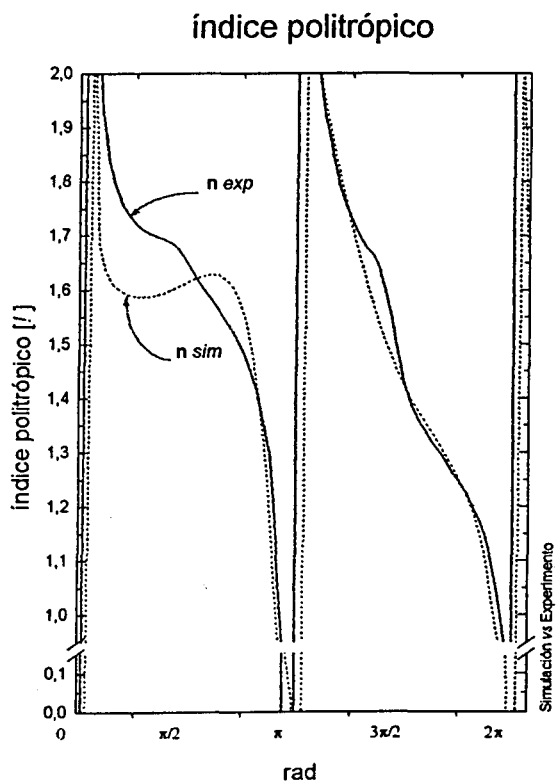
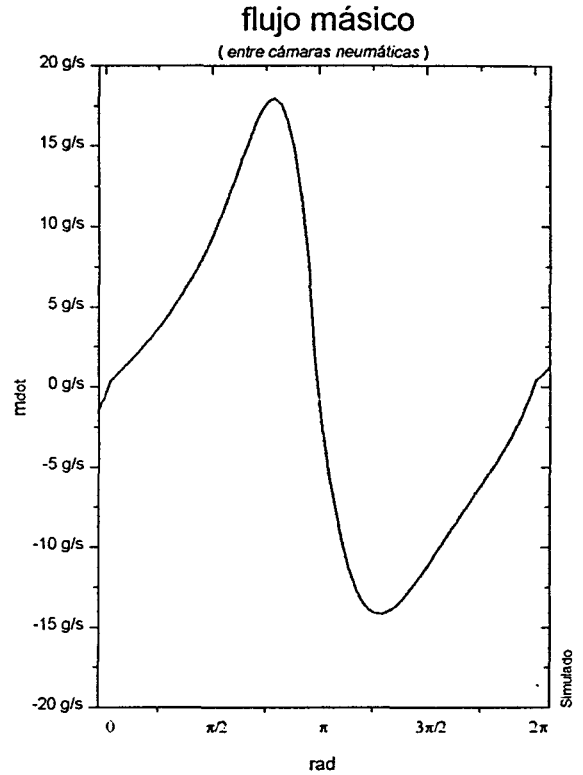
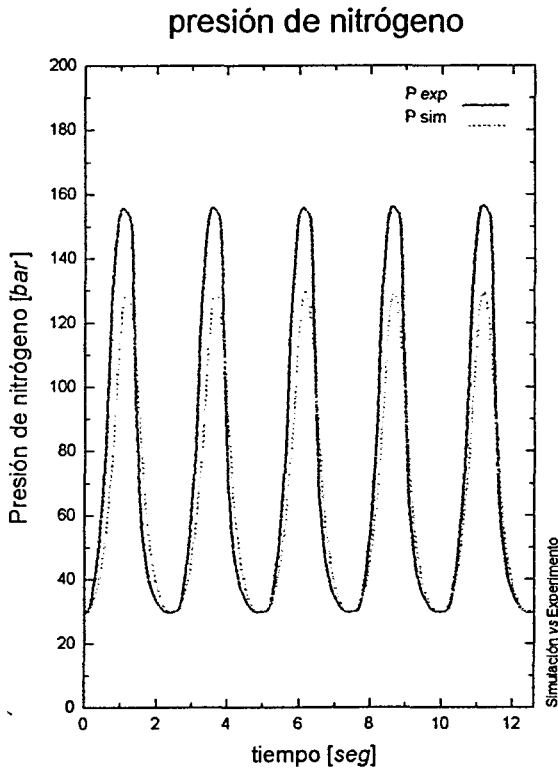
Pruebas experimentales 155\_6 realizadas el 941209 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.



## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

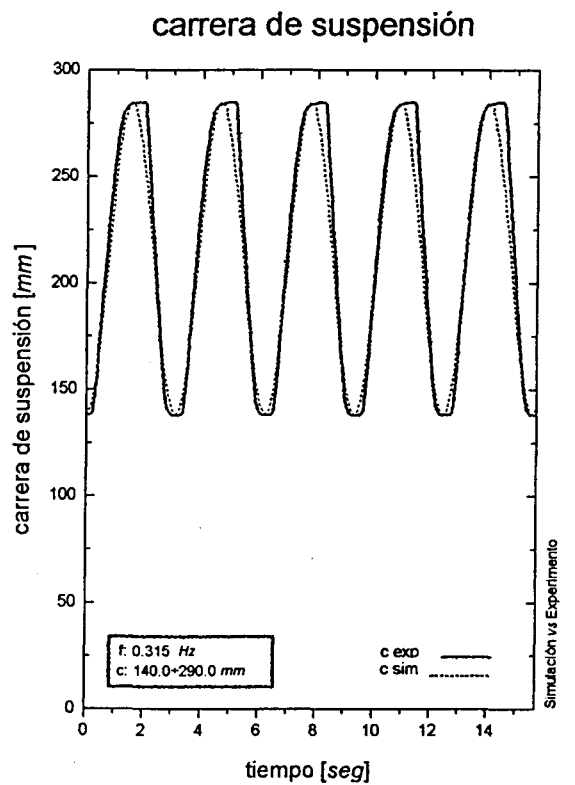
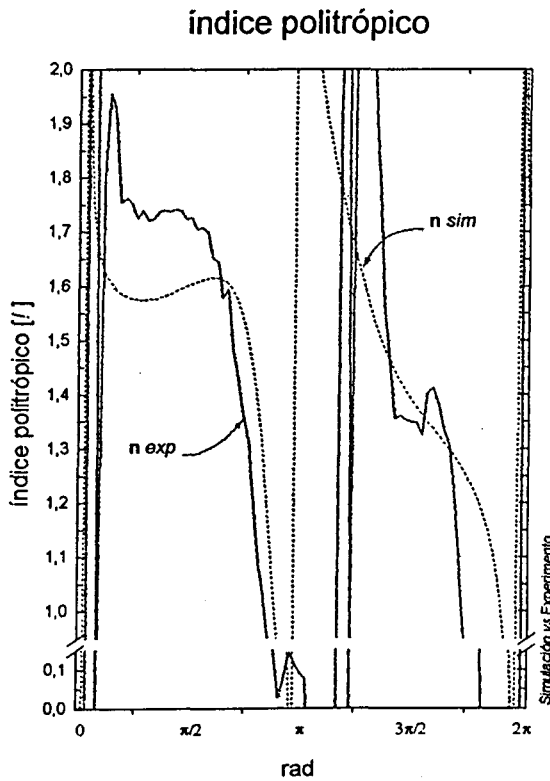
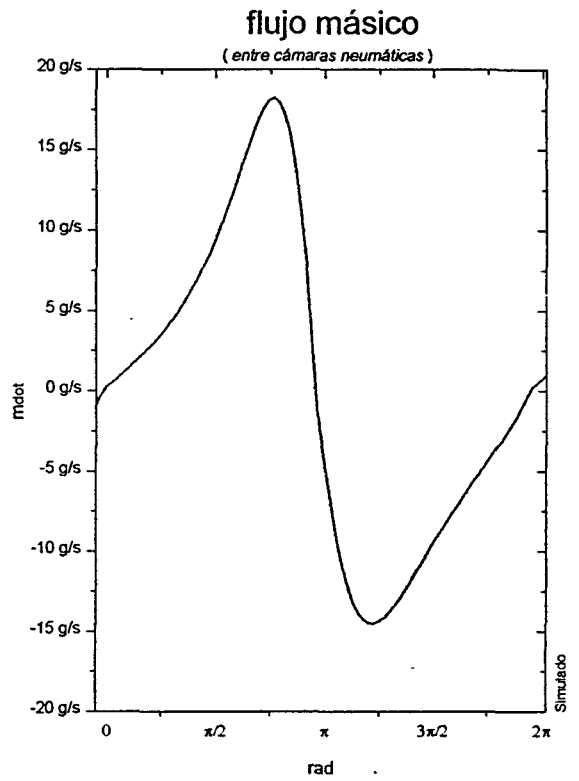
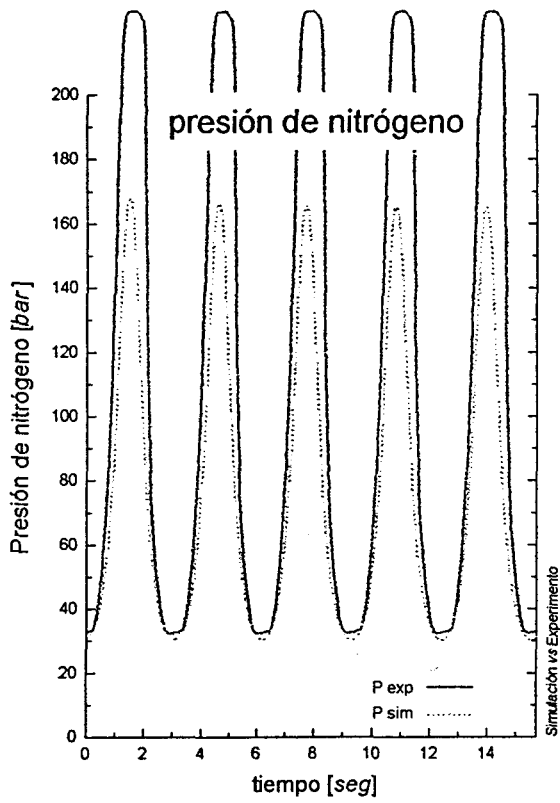
Pruebas experimentales 155\_7 realizadas el 9/11/2009 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.



# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

Pruebas experimentales 155\_8 realizadas en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.



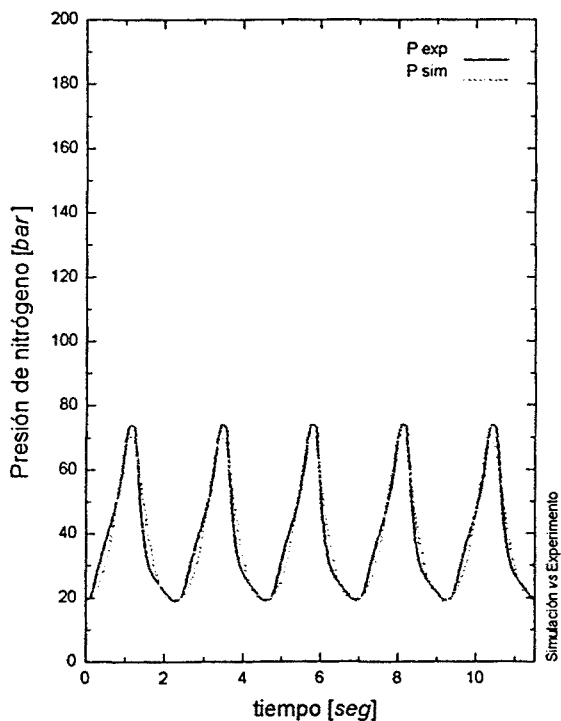


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

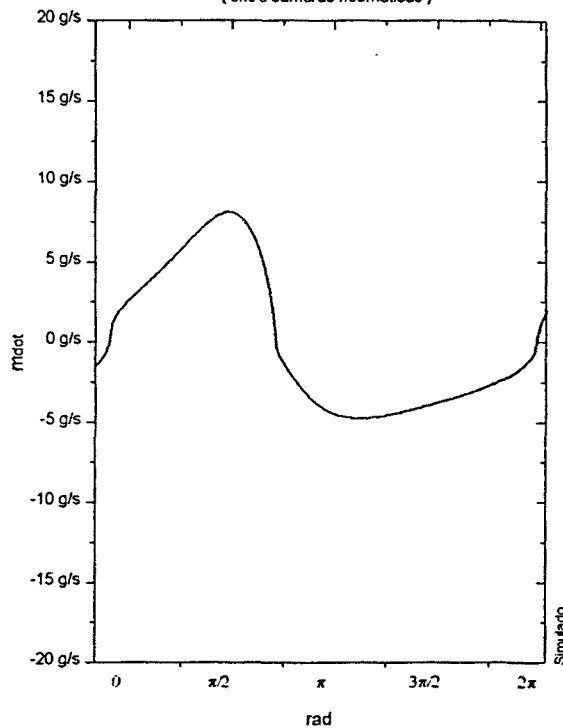
Pruebas experimentales 520\_11 realizadas el 941104 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

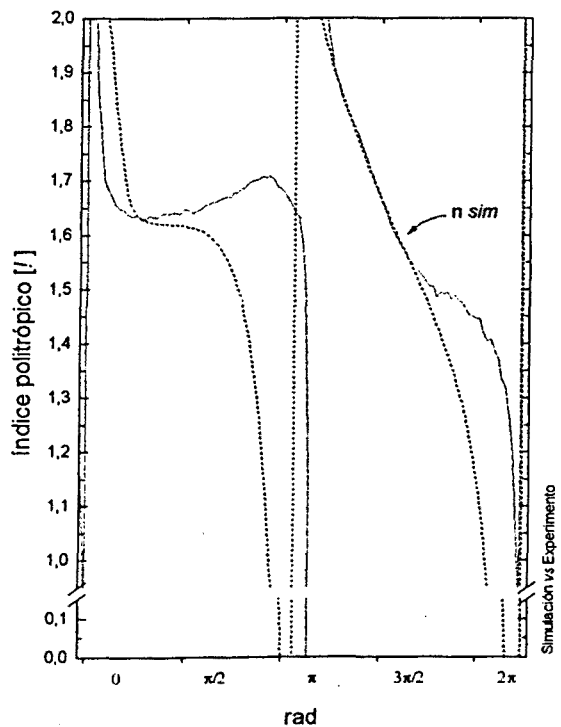


flujo másico

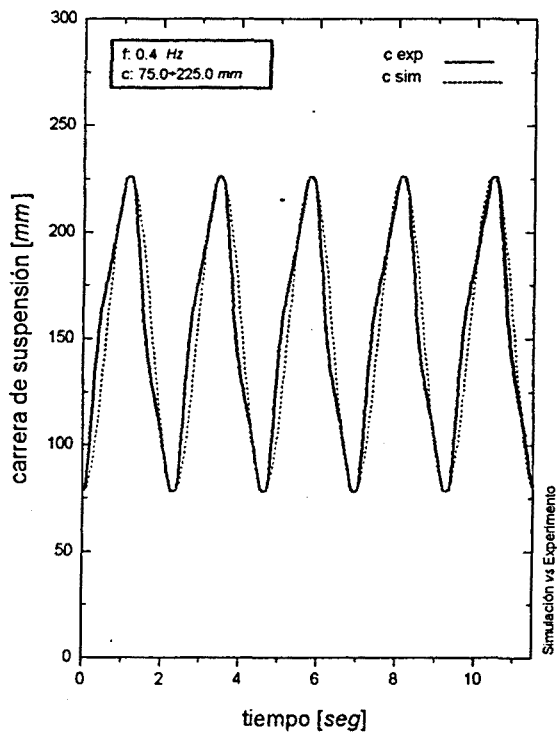
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

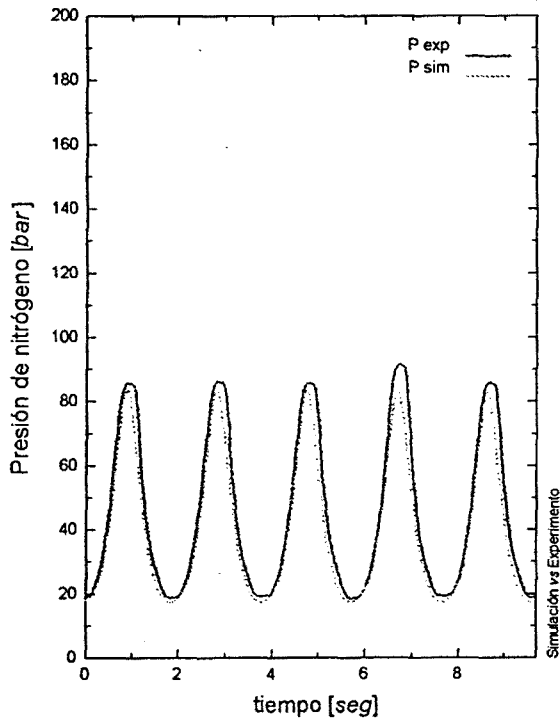


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

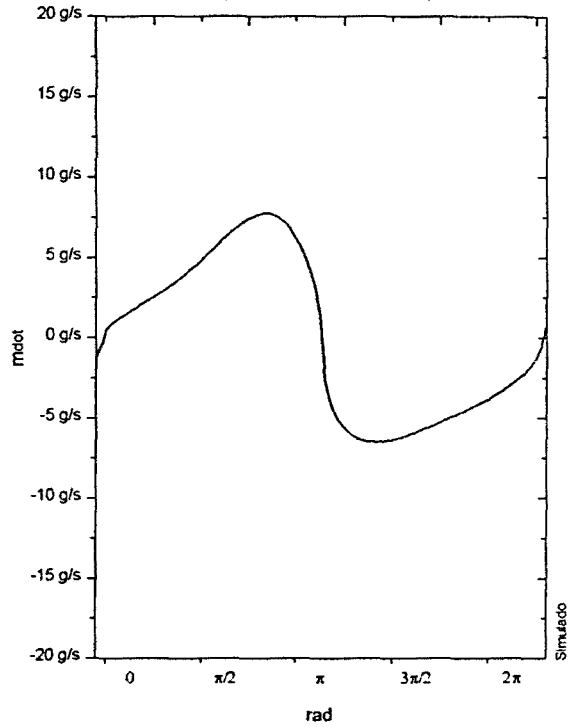
Pruebas experimentales 520\_12 realizadas en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

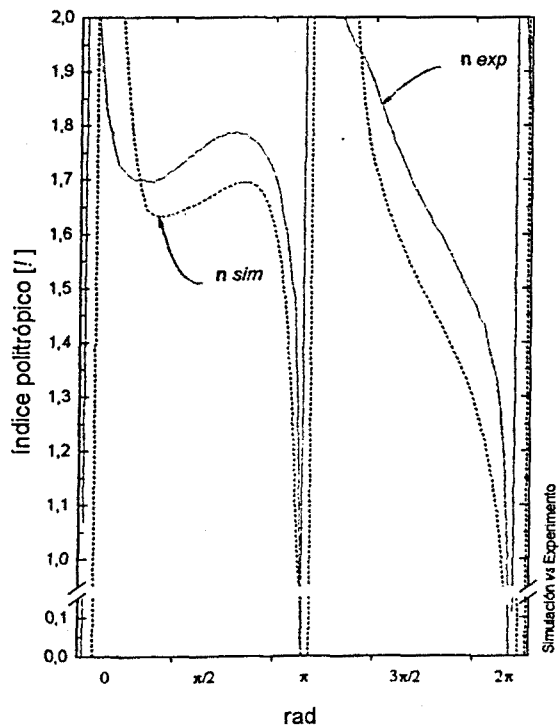


flujo másico

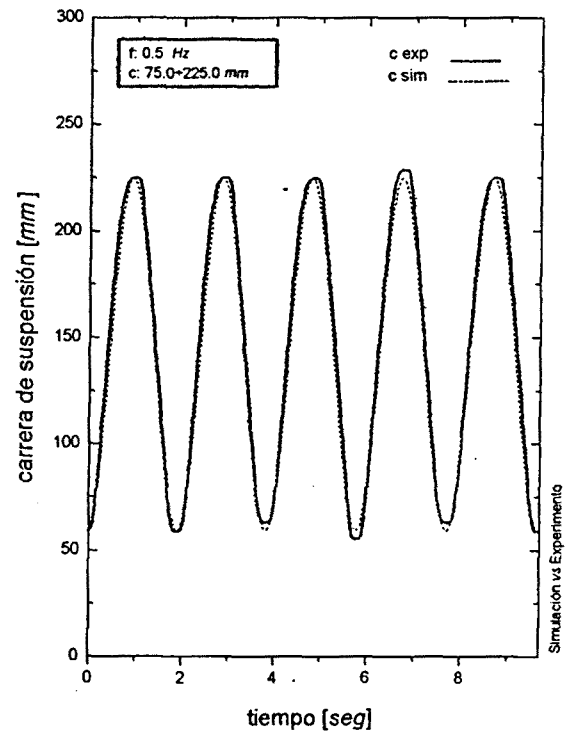
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

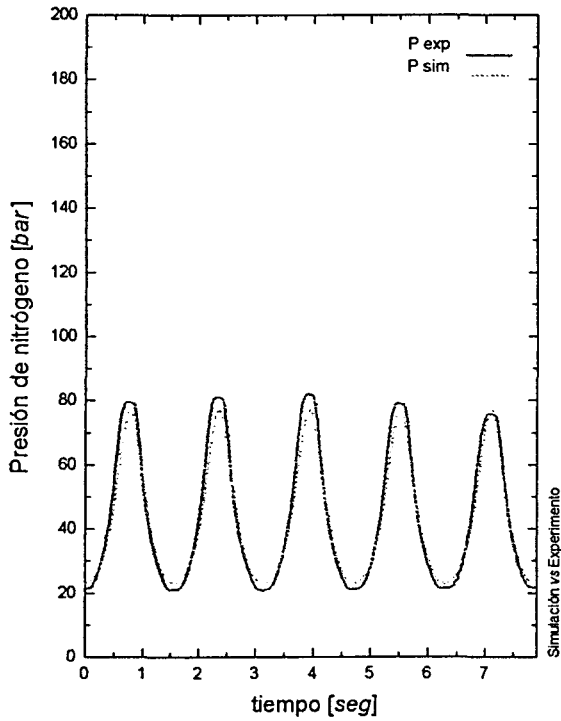


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

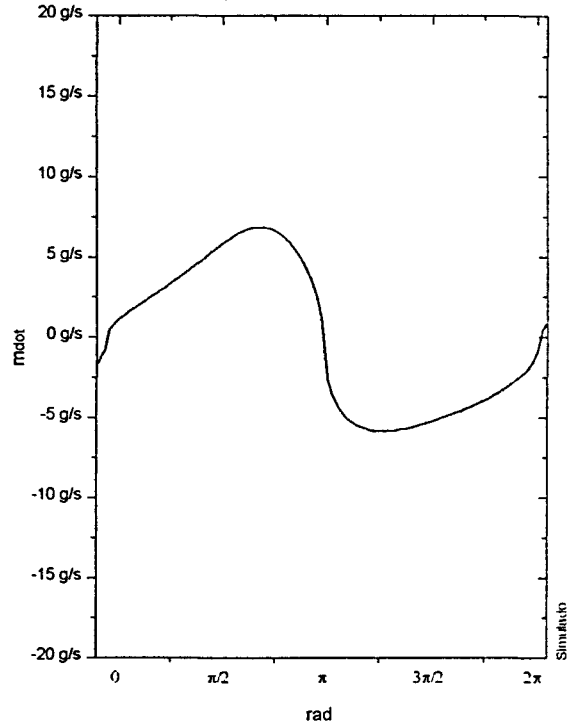
Pruebas experimentales 520\_13 realizadas el 941109 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

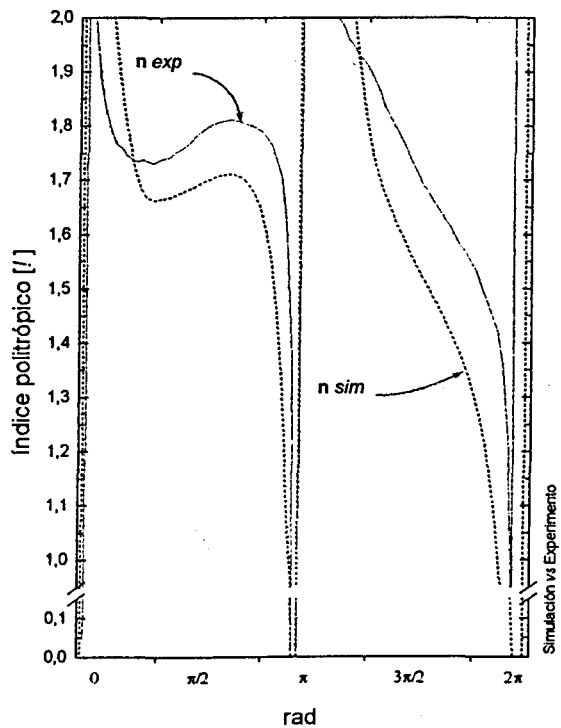


flujo másico

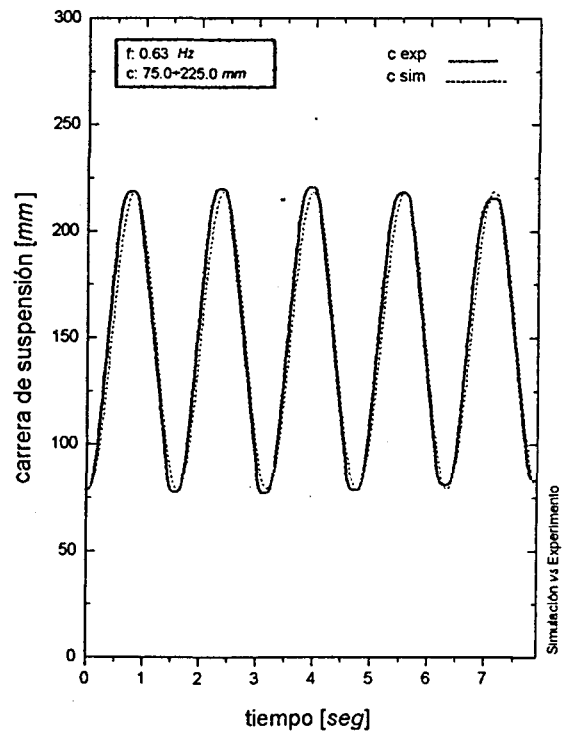
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

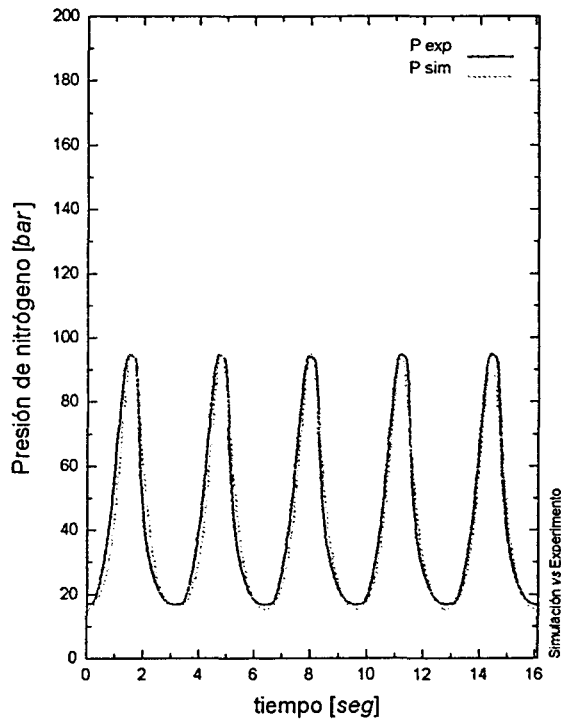


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

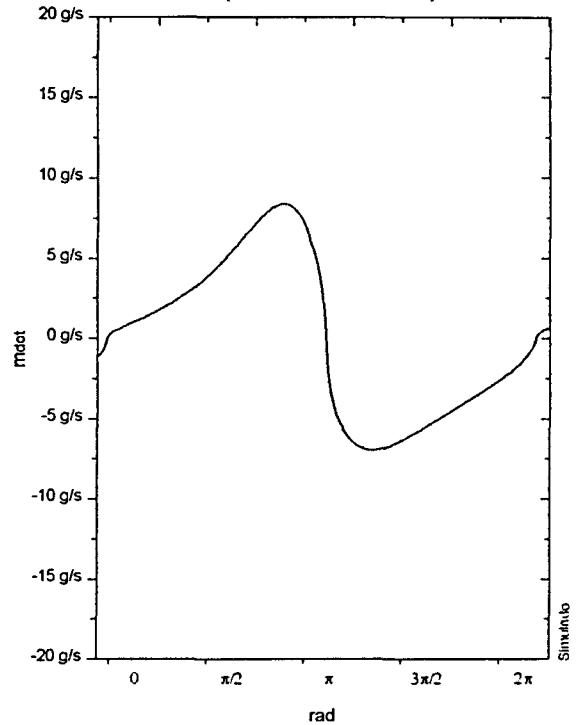
Pruebas experimentales 520\_21 realizadas el 941110 en el LABORATORIO de MECÁNICA de FLUIDOS de la E. T. S. E. I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

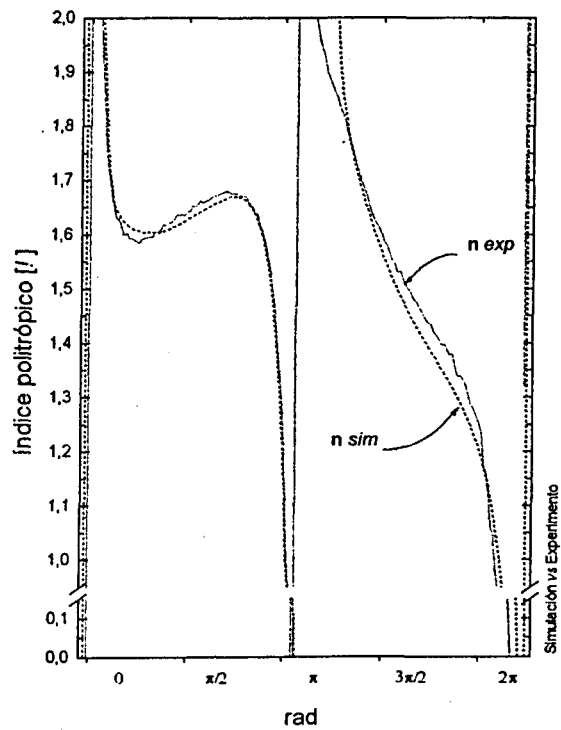


flujo másico

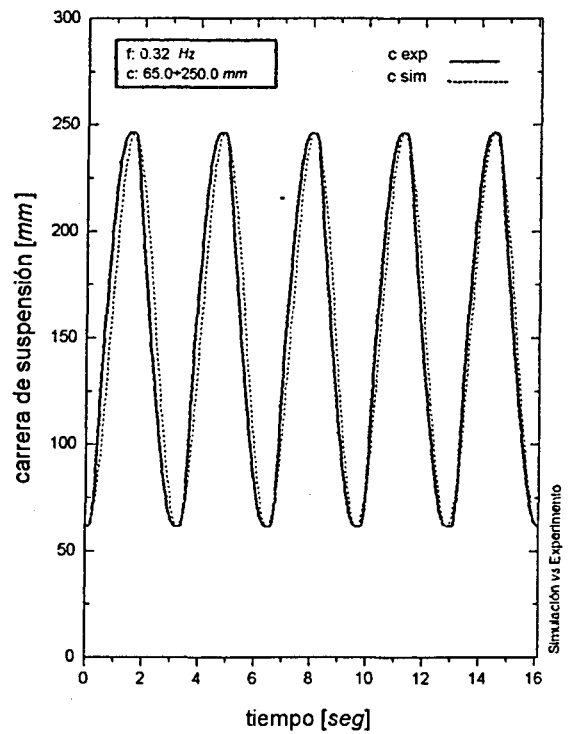
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

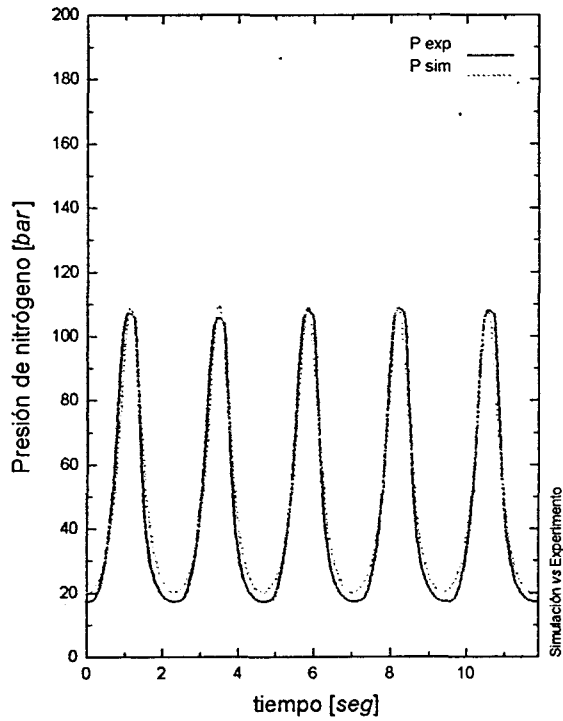


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

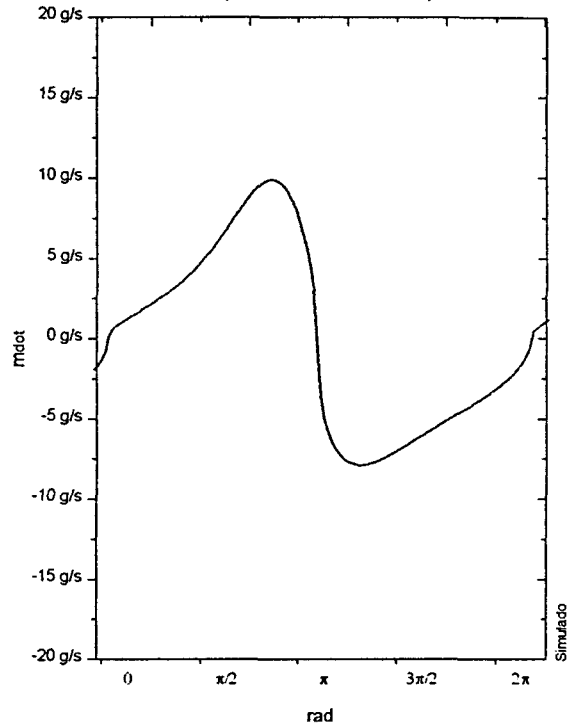
Pruebas experimentales 520\_22 realizadas el 941111 en el LABORATORIO de MECÁNICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

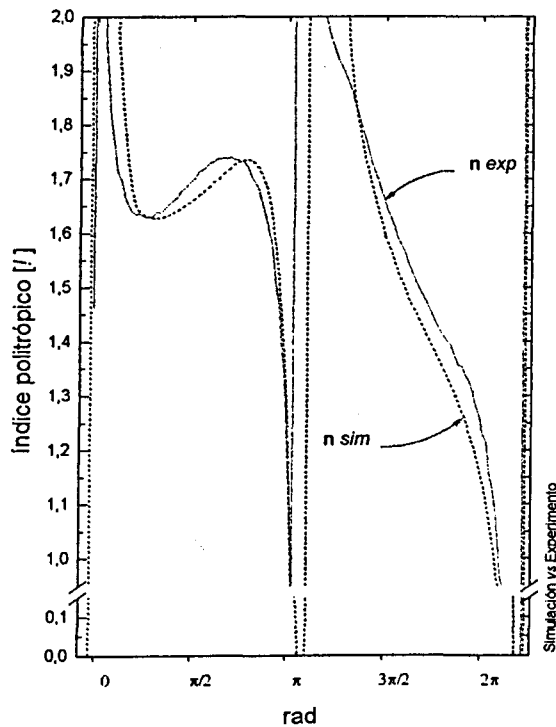


flujo másico

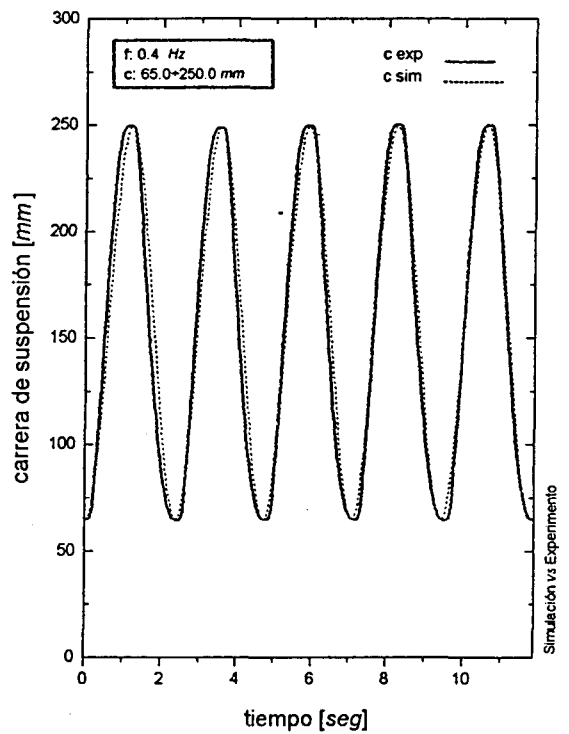
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

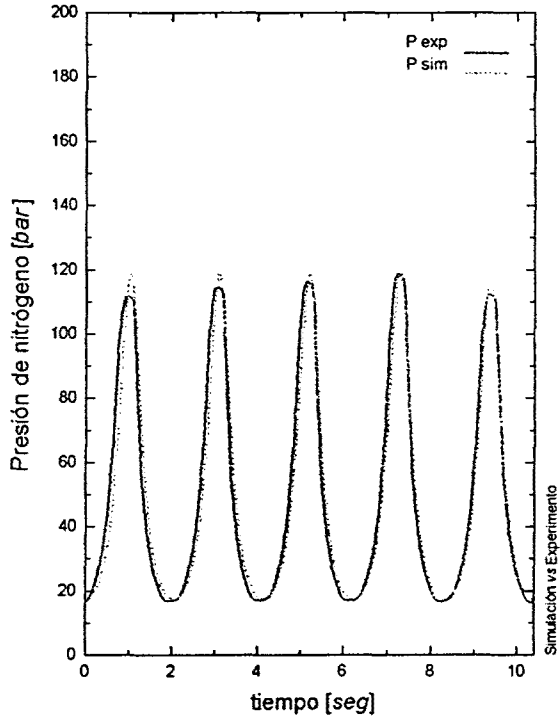


## Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

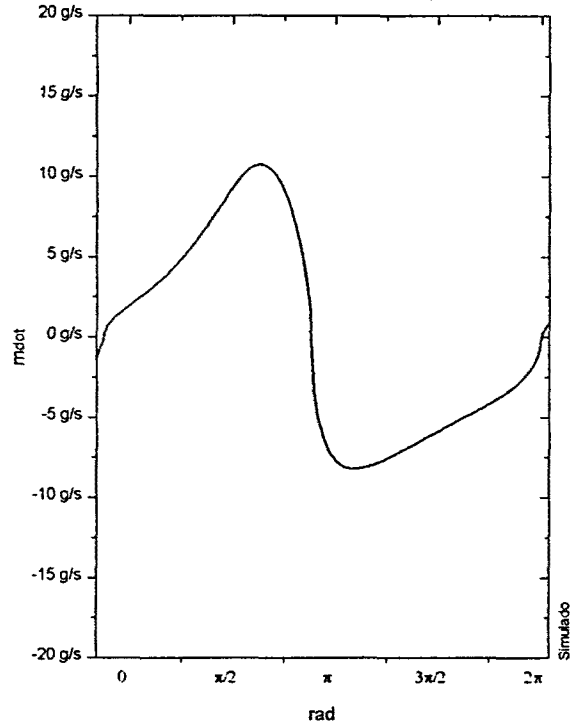
Pruebas experimentales 520\_23 realizadas el 941111 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

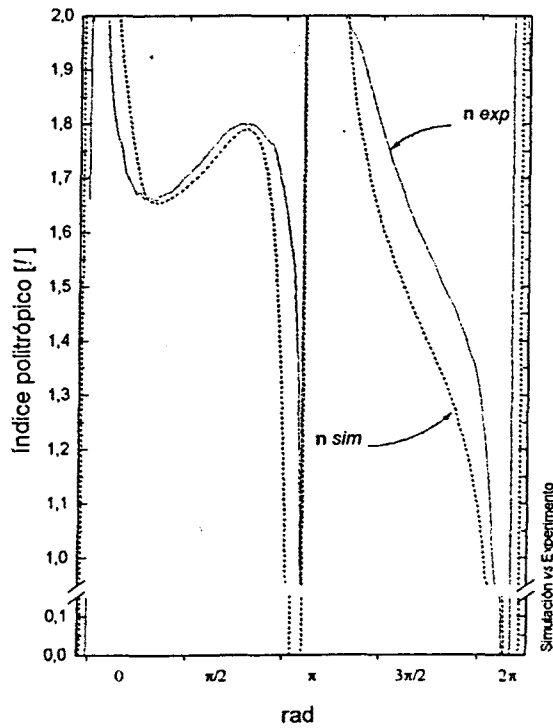


flujo másico

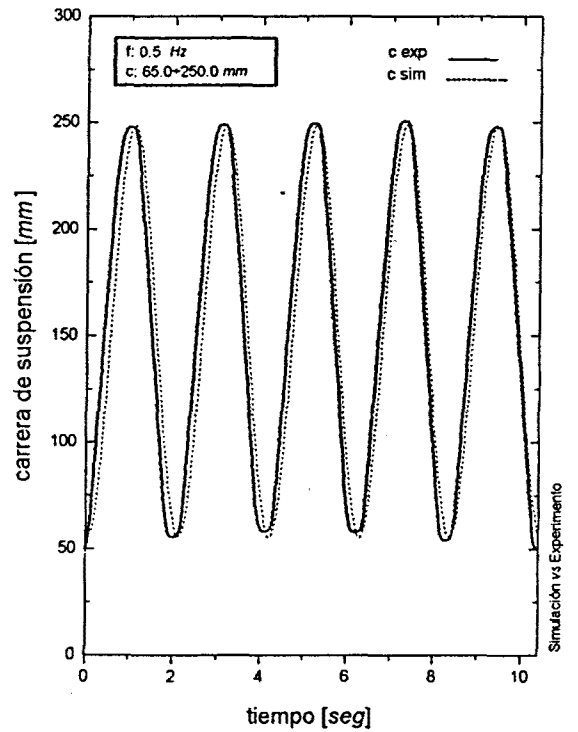
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

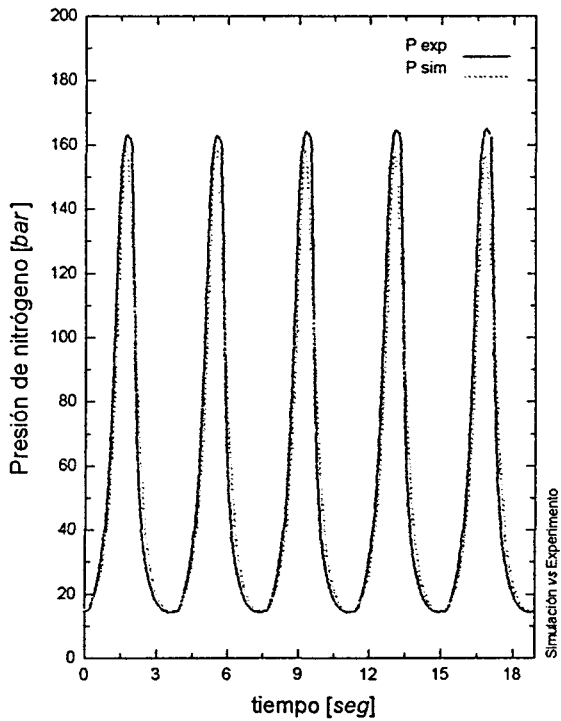


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

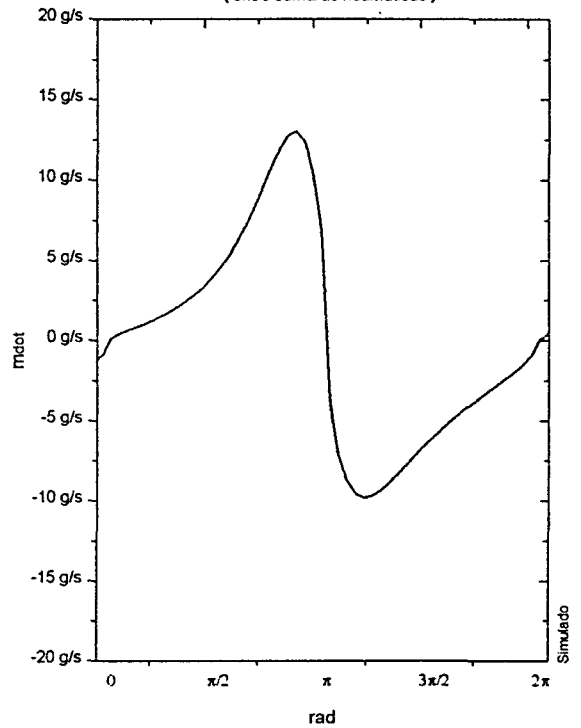
Pruebas experimentales 520\_31 realizadas el 941109 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

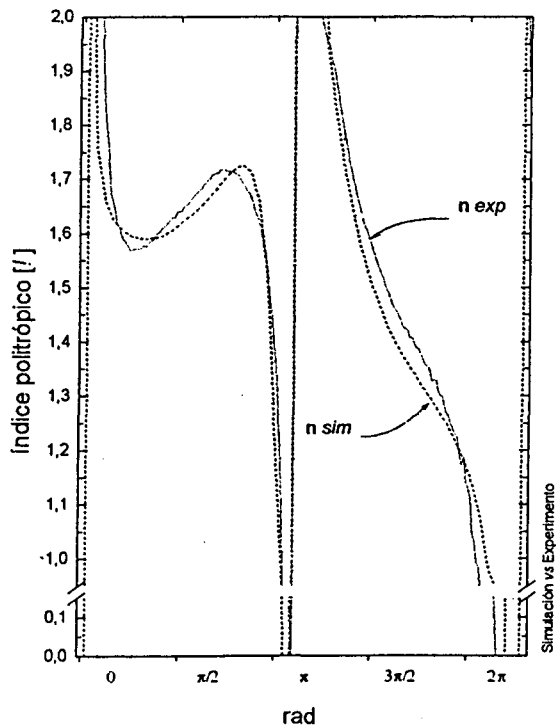


flujo másico

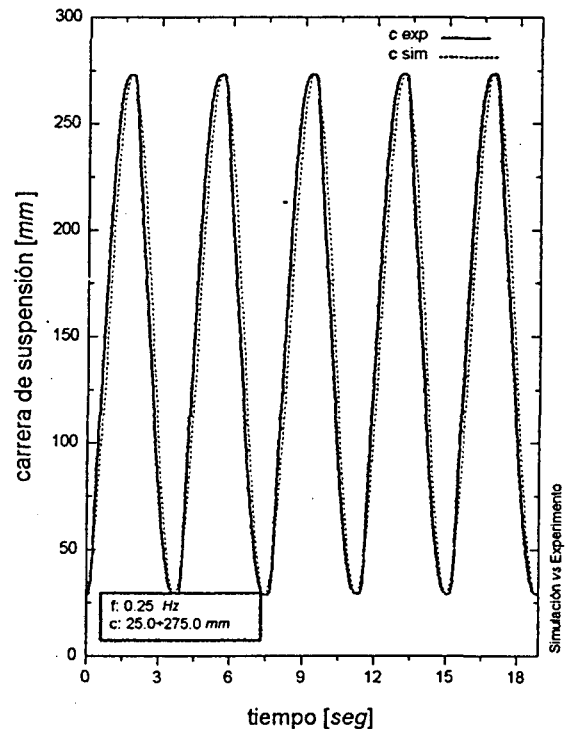
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión

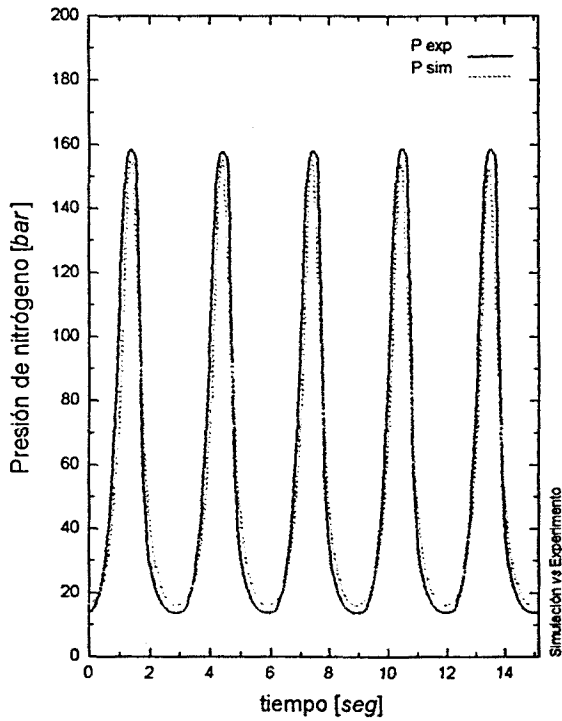


# Cotejo de Resultados

(S) de las Heras & FMS

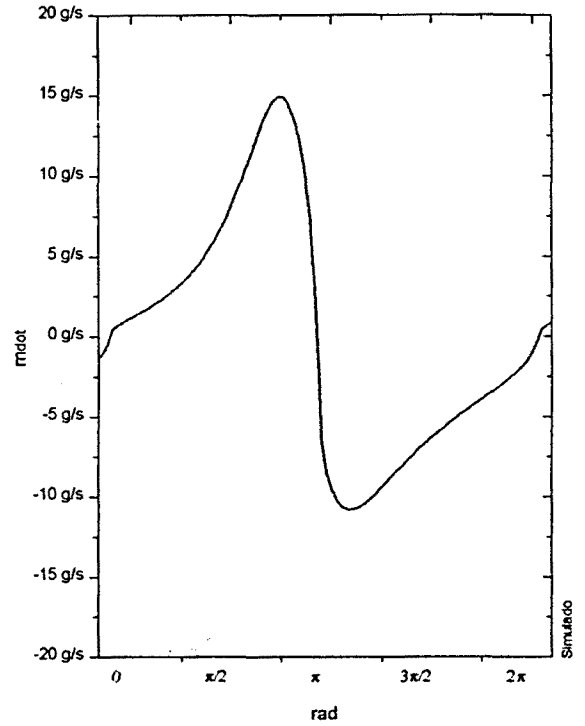
Pruebas experimentales 520\_32 realizadas el 941118 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

presión de nitrógeno

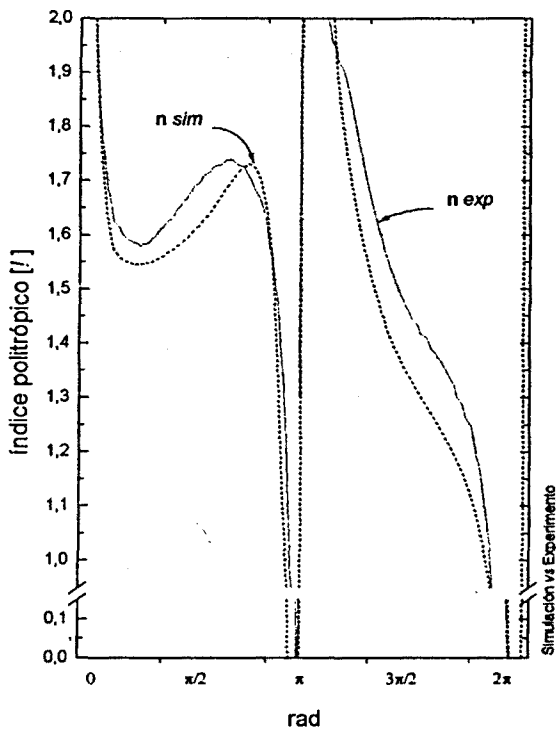


flujo másico

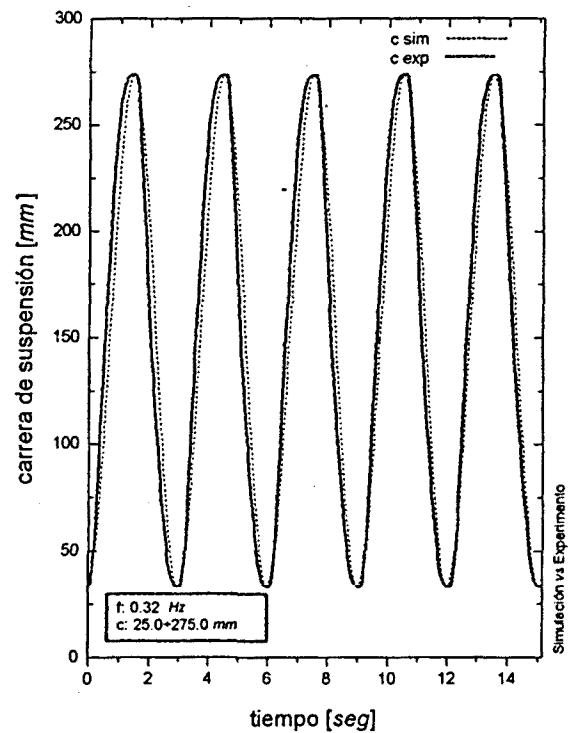
(entre cámaras neumáticas)



índice politrópico



carrera de suspensión



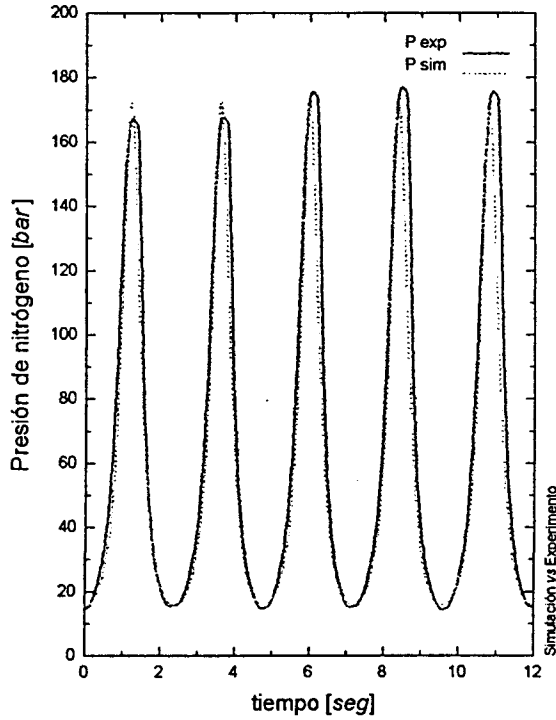


# Cotejo de Resultados

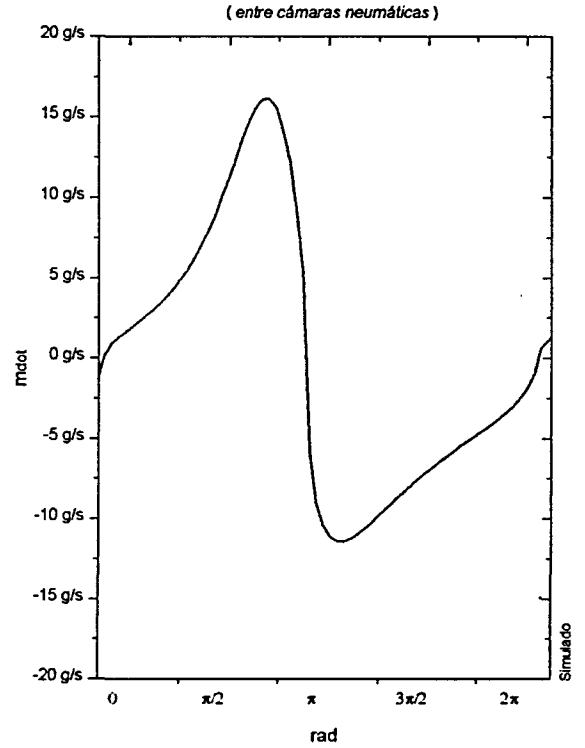
(S) de las Heras & FMS

Pruebas experimentales 520\_33 realizadas el 941118 en el LABORATORIO de MECANICA de FLUIDOS de la E.T.S.E.I. de Terrassa.

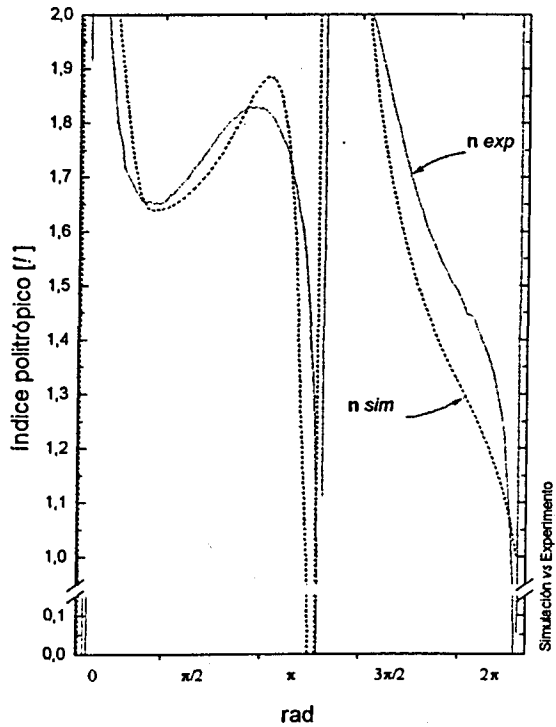
presión de nitrógeno



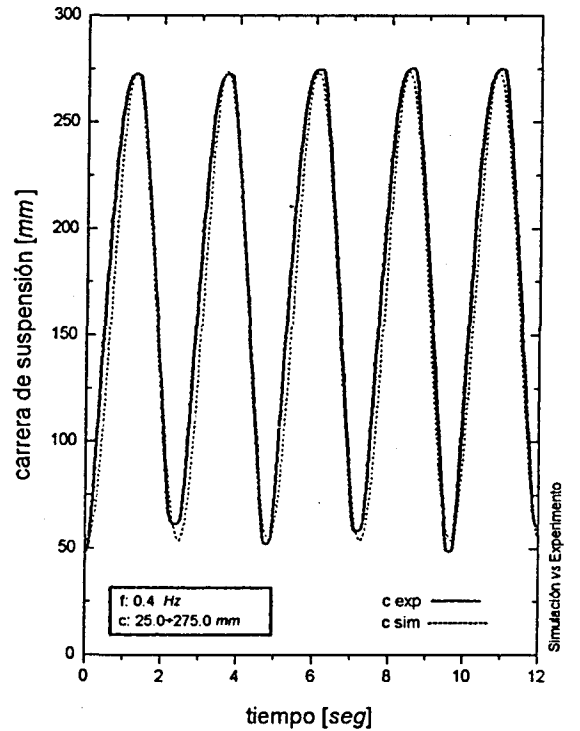
flujo másico



índice politrópico



carrera de suspensión



# Apéndice A6. PROGRAMA 2SUSPENS.AJO

Model File: 2suspens.ajo  
 Date: 12 / 12 / 1996  
 Time: 16 : 55  
 Timing: 100.000E-06 ,DELTA ; 5.0000 ,RANGE  
 PlotBlocks and Scales:  
 Format:

BlockNo,	Plot-MINimum,	Plot-MAXimum;	Comment
Horz: 0 ,	0.0000 ,	5.0000 ;	Time
Y1: 9928 ,	-20.0000 ,	10.0000 ;	control
Y2: 5 ,	0.0000 ,	300.0000 ;	cursa susp [mm]
Y3: 7 ,	0.0000 ,	100.0000 ;	gas pressure [bar]
Y4: 10 ,	-20.0000 ,	10.0000 ;	vehicle height

MODEL:

```

1 REM
;programa suspensión CESIA. TesisDoctoral (S) de las Heras
2 REM
;EWR real gas, Otis, 2 chambers and StickSlip
10.0000      5 GAI      123          ;cursa susp [mm]
100.0000     6 GAI      4015         ;ñ (exp)
10.0000      7 GAI      1139         ;gas pressure [bar]
              8 SUM      1081        -92      ;gas tempera,1 [°C]
              9 SUM      2081        -92      ;gas tempera,2 [°C]
-1.0000     10 GAI      5026         ;vehicle height
              75 SUM      5051        5050     ;-Vdot,cámara,1
              91 REM
;Condiciones iniciales y otros parámetros de diseño
273.1500     92 CON
;g [cms2]
981.0000     93 CON
;Patm,ambient [MPa]
0.1000000    95 CON
;Tempera ambiente [°C]
20.0000      96 CON
;Tamb [K]
20.0000      97 SUM      96          92      ;Tempera inflado [°C]
              98 CON
;Tinf [K]
              99 SUM      98          92      ;Fatm [100N]
              100 MUL     95          108     ;Fo
              101 SUM     5031        100     ;FPrecarga,abs [MPa]
1.6000       102 CON
;Volumen máx suspensión [cm3]
1.760E+03    103 CON
;Volumen min suspensión [cm3]
252.0000     104 CON
;Volumen interior émbolo [cm3]
190.0000     105 CON
;[FV]máx
50.2655      107 MUL     102          103     ;Ssusp [cm2]
              108 CON
;Vdespl,émbolo [cm3]
              111 SUM     103         -116     ;Volumen desplzble susp [cm^3]
              113 SUM     103         -104     ;Varranque,mig [cm3]
              114 MUL     108          119     ;Varranque,Twork [cm3]
              115 DIV     107          117     ;Farranque [MPa]
              116 MUL     115          135     ;c_arranque_mitja [cm]
              117 DIV     101          108     ;Posición relativa V/C.
              119 DIV     111          108     ;Posición relativa E/V.
              120 SUM     5025        5026     ;Carrera máxima susp [cm]
              121 SUM     5026        5027     ;cursa susp [cm]
              122 DIV     113          108     ;Posición abs vástago
              123 SUM     119          120     ;xdot,rel
              124 SUM     119         -5026     ;ToN2 [K]
              125 SUM     5020        5021     ;ToN2 [°C]
              130 SUM     92          131     ;To_wall_in [K]
20.0000      131 CON
;To_wall_out [K]
              132 SUM     130         -134     ;T/T]-V/V]
2.0000       133 ATT     132          97      ;Kcompresibilidad aceite
1.0000       134 CON
              135 DIV     130          99      ;Vtotal,oli
              140 CON
;Vinf,oli
1.400E+03    140 CON
2.160E+03    150 CON
              153 SUM     150         -156     ;Vsup,oli a c=0mm
28.2743      154 GAI     123
160.0000     155 CON
              156 SUM     155          154     ;Vsup,oli
    
```

```

309.000E-06      160 CON                                ;masa émbolo [kg*]
0.1529000      161 CON                                ;masa vástago +1/4veh [kg*]
0.0513500      162 CON                                ;masa cilindro,rueda [kg*]
981.0000       163 GAI      160      161      162      ;PesoTotSuspendido [100N]
301 REM
;macro sticksus.mac [69blk]
302 REM
;in:F(1,2,3) [100N], V1,2,3 [cms]; out:F(12,23),RS [100N]
1.0000         303 GAI      5040                                ;F1 [100N]
1.0000         304 GAI      5041                                ;F2 [100N]
1.0000         305 GAI      5042                                ;F3 [100N]
1.0000         306 GAI      5020                                ;V1 [cms]
1.0000         307 GAI      5021                                ;V2 [cms]
1.0000         308 GAI      5022                                ;V3 [cms]
                                     309 SUM      306      307      ;V12
                                     310 SUM      307      308      ;V23
                                     311 SUM      303      -304      305      ;F1-F2+F3
312 REM
;arranging for calculation
1.0000         313 GAI      162                                ;m1 [kg*],cilindro
1.0000         314 GAI      161                                ;m2 [kg*],vástago
1.0000         315 GAI      160                                ;m3 [kg*],émbolo
                                     316 SUM      313      314      315      ;mT
                                     317 SUM      313      314      ;m12
                                     318 SUM      314      315      ;m23
                                     319 DIV      313      316      ;m1/T
                                     320 DIV      315      316      ;m3/T
                                     321 DIV      313      317      ;m1/m12
                                     322 DIV      315      318      ;m3/m23
                                     323 SUM      304      -303      -328      ;F2-F1-F23,S
                                     324 SUM      304      -305      -327      ;F2-F3-F12,S
325 REM
;case iv/ << on slipping >>
326 REM
;valor de arranque 2/3Fij,R (high)
327 FNC      309
1      -1.0000      -11.1800
2      -1.000E-06      -11.1100
3      0.0000      0.0000
4      1.000E-06      11.1100
5      1.0000      11.1800
328 FNC      310
1      -1.0000      -9.0700
2      -1.000E-06      -9.0000
3      0.0000      0.0000
4      1.000E-06      9.0000
5      1.0000      9.0700
329 REM
;case i/ << on sticking >>
330 MUL      311      319
331 SUM      303      -330      ;F12,R
332 MUL      311      320
333 SUM      305      -332      ;F23,R
334 REM
;case iii/ << on sticking >>
335 MUL      321      323
336 SUM      303      -335      ;F12,R
337 REM
;case ii/ << on sticking >>
338 MUL      322      324
339 SUM      305      -338      ;F23,R
340 REM
;control stick=slip [!]
0.0500000     341 CON                                ;V,lim for sticking
342 ABS      309
343 ABS      310
344 SUM      342      -341
345 SUM      343      -341
0.0000        346 CON                                ;"0"
1.0000        347 CON                                ;"1"
348 IFE      344      347      346      ;slip 12
349 IFE      345      347      346      ;slip 23
350 IFE      344      346      347      ;stick 12
351 IFE      345      346      347      ;stick 23
352 AND      350      351
353 AND      348      351
354 AND      349      350
355 AND      348      349
356 MUL      331      352      ;F12,R
357 MUL      333      352      ;F23,R

```

```

358 MUL 327 353 ;F12,S
359 MUL 339 353 ;F23,R
360 MUL 328 354 ;F23,S
361 MUL 336 354 ;F12,R
362 MUL 327 355 ;F12,S
363 MUL 328 355 ;F23,S
-16.6600 364 LIM 356 361 ;F12,R << on sticking >>
16.6600
-13.5000 365 LIM 357 359 ;F23,R << on sticking >>
13.5000
366 REM
;output: F12,RS & F23,RS [100N]
367 SUM 358 362 364 ;F12
368 SUM 360 363 365 ;F23
369 REM
;END sticksus.mac
501 REM
;macro WallTemp.mac [38blk]
502 REM
;in:vrel's [cms]; To_wall's [K]; QOtis's [Watt]; out: T_wall's [K,°C]
1.0000 503 GAI 5020 5021 ;vc,vv (+compress)
1.0000 504 GAI 5021 5022 ;vv,ve (+compress)
1.0000 505 GAI 132 ;To_wall_in [k]
1.0000 506 GAI 133 ;To_wall_out [k]
1.0000 507 GAI 97 ;Tamb [K]
1.0000 508 GAI 1083 ;QOtis,1 (fromgastowall)
1.0000 509 GAI 2083 ;QOtis,2 (fromgastowall)
510 REM
;Constants & Other parameters
0.0691350 511 CON ;MeanFrictionHeatCoef [kg*/s]
5.0000 512 CON ;AveragedAmbDifuss [Watt/K]
3.7530 513 CON ;m_wall_in [kg]
5.6280 514 CON ;m_wall_out [kg]
3.0900 515 CON ;m_wall_e [kg]
490.0000 516 CON ;SpecificHeat_wall [J/kg/K]
273.1500 517 CON
872.6320 518 CON ;WallConductivity [W/K]
519 REM
;Cálculos
520 MUL 511 503 503
521 MUL 511 504 504
522 SUM 530 -507
523 MUL 512 522 ;Qext,amb [Watt]
0.0000 524 VC 525 508 521 ;delta:T_wall_in
-537
525 MUL 513 516 ;mC_in [J/K]
526 SUM 505 524 ;T_wall_in [K]
527 SUM 526 -517 ;T_wall_in [°C]
0.0000 528 VC 529 520 537 ;delta:T_wall_out
-523
529 MUL 514 516 ;mC_out [J/K]
530 SUM 506 528 ;T_wall_out [K]
531 SUM 530 -517 ;T_wall_out [°C]
0.0000 532 VC 533 509 521 ;delta:T_wall_e
533 MUL 515 516 ;mC_e [J/K]
534 SUM 505 532 ;T_wall_e [K]
535 SUM 534 -517 ;T_wall_e [°C]
536 SUM 526 -530
537 MUL 518 536 ;Qconducted [Watt]
538 REM
;END WallTemp.mac
999 TIM
1000 REM
;macro camara_1.mac [160blk]
1001 REM
;include BWRrealgas, ctt_Otis, polilogo, CvN2, (Vdot&Flux)
1002 REM
;i
1003 REM
;out: T[K], u[J/g], v[cm3/g], V[cm3], m[g], P[MPa], n[1]
0.0000 1004 CON
1.0000 1005 GAI 75 ;-Vdot[cm3s]
1.0000 1006 GAI 3051 ;mdot[kgs]
1.0000 1007 GAI 3050 ;fluxentalphy[Watt]
-1.0000 1008 GAI 3054 ;Qint[Watt]
1.0000 1009 GAI 526 ;Tw [K]
1.0000 1010 GAI 130 ;To1 [K]
1.0000 1011 GAI 117 ;PoN2[K]
1.0000 1012 GAI 116 -2012 ;Vo,1[cm3]

```

```

1013 MUL 1011 1012
1014 DIV 1013 1010
0.2970000 1015 ATT 1014 ;m[g]
0.0000 1016 INT -1005
0.0010000 1017 SUM 1012 1016 ;V[cm3]
0.0000 1018 C -1006
1019 SUM 1018 1015 ;m[g]
1020 DIV 1017 1019 ;v[cm3/g]
1021 REM
;macro cvn2.mac CvN2[J/gK]=a+bF-cP^2: [19blk]
1022 REM
;in: T[K], P[MPa]; out: Cv[J/gK]
1.0000 1023 GAI 1139 ;gas pressure [MPa]
126.2000 1024 ATT 1081 ;reduced tempera [']
1025 SUM 1031 1032 1033 ;a
1026 MUL 1023 1036 ;bF
1027 MUL 1023 1023 1038 ;cP^2
1028 SUM 1025 1026 -1027 ;Cv[J/gK]
1029 MUL 1024 1024 ;Tr^2
1030 MUL 1024 1029 ;Tr^3
-0.0309430 1031 GAI 1024
0.0079340 1032 GAI 1029
0.7749880 1033 CON
-294.800E-06 1034 GAI 1030
-1.8126 1035 FWR 1024 ;Tr^
0.0120795 1036 GAI 1035
-2.8593 1037 FWR 1024 ;Tr^
382.600E-06 1038 GAI 1037
1039 REM
;END cvn2.mac
1040 REM
;ctt_Otis.mac [35blk]
1041 REM
;in: m[g], V[cm3], T,Tw[K], Cv[J/gK]; out: mCv/ctt[Watt/K]
1042 REM
;constant thermal time (Otis/Fourmovahed) [SI]
1.0000 1043 GAI 1081 ;T[K]
1.0000 1044 GAI 1009 ;Tw[K]
1.000E+06 1045 ATT 1017 ;V[cm3]
1.000E+03 1046 ATT 1019 ;m[g]
1.000E+03 1047 GAI 1028 ;Cv[J/gK]
0.0650000 1048 CON ;Dint[m]
1049 MUL 1048 1048
0.7853980 1050 GAI 1049 ;δD^2/4
2.0000 1051 GAI 1050 ;δD^2/2
3.1416 1052 GAI 1048 ;δD
1053 DIV 1045 1050 ;L=4V/δD^2
1054 SUM 1051 1056 ;Aw
80.1808 1055 GAI 1065 ;(3/1,6151)
1056 MUL 1052 1053 ;δDL
2.5280 1057 FWR 1060
1058 MUL 1048 1054 ;AwD
1059 DIV 1045 1058 ;F
1060 DIV 1044 1043 ;Tw/T
1061 ABS 1043 -1044 ;T-Tw
1062 MUL 1073 1063 1053 ;ro2gL3(T-Tw)
1061
9.8100 1063 CON ;g
1064 MUL 1046 1053 ;mL
1065 DIV 1064 1054 ;mL/Aw
-1.7600 1066 FWR 1059
-0.3440000 1067 FWR 1062
1068 MUL 1055 1066 1057 ;const th time
1067
1069 MUL 1046 1047 ;mCv[J/K]
1070 DIV 1069 1071 ;mCv/ctt
1.000E-06 1071 LIM 1068 ;0(ctt)y
1.000E+06
1072 DIV 1046 1045 ;ro[kg/m3]
1073 MUL 1072 1072 ;ro^2
1074 REM
;END ctt_Otis.mac
1075 REM
;pipi equation
0.0000 1076 VC 1019 -1008 -1083
1084 -1089
0.7460000 1077 SUM 1076 1078 ;u [J/g]
1078 GAI 1010 ;uo

```

```

0.0000      1079 MUL      1019      1028      ;mCv[J/K]
            1080 VC      1079      -1008      -1083
            1084      -1088
            1081 SUM      1010      1080      ;T
            1082 SUM      1081      -1009      ;T-Tw
            1083 MUL      1070      1082      ;Cext
            1084 IFE      1006      1004      1007 ;Q,fluxentalhy[Watt]
            1085 MUL      1006      1020
1.000E+03   1086 GAI      1085      ;v·mdot[cm3s]
            1087 SUM      -1005      1086
            1088 MUL      1087      1138      ;T{dP/dT}v)-(Vdot-v·dm/dt)
            1089 MUL      1087      1139      ;P·(Vdot-v·dm/dt)
            1090 REM
;macro BWR_real.mac eqostate [51blk]
            1091 REM
;in: V[cm3], m[g], T[K]; out P, T(dp/dT)v [atm,MPa]
1.0000      1092 GAI      1081      ;T[K]
1.0000      1093 GAI      1019      ;m[g]
1.0000      1094 GAI      1017      ;V[cm3]
            1095 REM
;gas constants
0.0820700   1096 CON      ;R [atm/Kmol]
1.1925      1097 CON      ;BWR-Ao
0.0458000   1098 CON      ;BWR-Bo
5.889E+03   1099 CON      ;BWR-Co
0.0149000   1100 CON      ;BWR-a
0.0019815   1101 CON      ;BWR-b
548.0640    1102 CON      ;BWR-c
291.545E-06 1103 CON      ;BWR-alpha
0.0075000   1104 CON      ;BWR-gamma
35.7143     1105 DIV      1093      1094 ;gas density [g/cm3]
            1106 GAI      1105      ;gas density [mol/l]
            1107 MUL      1106      1106
            1108 MUL      1106      1107
            1109 MUL      1108      1108
            1110 MUL      1092      1092
            1111 REM
;BWR equation of state
            1112 MUL      1092      1096      1106
            1113 MUL      1092      1096      1098
            1114 DIV      1099      1110
            1115 SUM      1113      -1097      -1114
            1116 MUL      1107      1115
            1117 MUL      1092      1096      1101
            1118 SUM      1117      -1100
            1119 MUL      1118      1108
            1120 MUL      1100      1103      1109
            1121 MUL      1104      1107
            1122 EXP      -1121
            1123 SUM      1121      1124
1.0000      1124 CON
            1125 MUL      1102      1122      1123
            1126 DIV      1125      1110
            1127 MUL      1126      1108
            1128 REM
;T{dP/dT}v BWR real_gas
            1129 MUL      1114      1107
            1130 SUM      1129      -1127
            1131 MUL      1132      1130
2.0000      1132 CON
            1133 MUL      1106      1117
            1134 SUM      1133      1113
            1135 MUL      1107      1134
            1136 SUM      1112      1116      1119 ;gas pressure [atm]
            1120      1127
            1137 SUM      1112      1135      1131 ;real gas T{dP/dt}v [atm]
0.1013250   1138 GAI      1137      ;real gas T{dP/dt}v [MPa]
0.1013250   1139 GAI      1136      ;PCMPa]
            1140 REM
;END BWR_real.mac
            1141 REM
;macro polilogo.mac [18blk]
            1142 REM
;estimación logarítmica índice politrópico
            1143 REM
;in: V[cm^3],P[MPa]; out n[!]
1.0000      1144 GAI      1020      ;gas volumen [cm3/g]
1.0000      1145 GAI      1139      ;gas pressure [MPa]
0.0010000   1146 DEL      1145      ;DElay pressure

```

```

0.1000000
3.0000
0.0010000    1147 DEL    1144                ;DElay volumen
0.1000000
850.0000
                1148 DIV    1145    1146
                1149 DIV    1147    1144
                1150 LOG    1148                ;log(P/Po)
                1151 LOG    1152                ;log(Vo/V)
1.000E-06     1152 REL    1149    1153    1153 ;Non divide by zero
                1157
1.000E-06     1153 CON
-1.0000       1154 CON
                1155 DIV    1150    1151        ;#
0.8000000    1156 LIM    1155                ;indice poli logo
2.2000
                1157 ABS    1154    1149
                1158 REM
;END polilogo.mac
                1159 REM
;END camara_1.mac
                2000 REM
;macro camara_2.mac [160blk]
                2001 REM
;include BWRrealgas, ctt_Otis, polilogo, CvN2, (Vdot&Flux)
                2002 REM
;in:-Vdot=0, mdot[kgs], fluxentalphy,Qint[Watt](+)fromto2, Tw[K]
                2003 REM
;out: T[K], u[J/g], v[cm3/g], V[cm3], m[g], P[MPa], n[!]
0.0000        2004 CON
0.0000        2005 GAI    75                ;-Vdot=0
-1.0000       2006 GAI    3051              ;mdot[kgs]
1.0000        2007 GAI    3050              ;fluxentalphy[Watt]
1.0000        2008 GAI    3054              ;Qint[Watt]
1.0000        2009 GAI    534                ;Tw [K]
1.0000        2010 GAI    130                ;To2 [K]
1.0000        2011 GAI    1011              ;PoN2[K]
1.0000        2012 GAI    105                ;Vo,2[cm3]
                2013 MUL    2011    2012
                2014 DIV    2013    2010
0.2970000    2015 ATT    2014                ;mo[g]
0.0000        2016 INT    -2005
                2017 SUM    2012    2016        ;V[cm3]
0.0010000    2018 C      -2006
0.0000
                2019 SUM    2018    2015        ;m[g]
                2020 DIV    2017    2019        ;v[cm3/g]
                2021 REM
;macro cvn2.mac CvN2[J/gK]=a+bP-cP^2: [19blk]
                2022 REM
;in: T[K], P[MPa]; out: Cv[J/gK]
1.0000        2023 GAI    2139              ;gas pressure [MPa]
126.2000     2024 ATT    2081              ;reduced tempera [!]
                2025 SUM    2031    2032    2033 ;a
                2034
                2026 MUL    2023    2036        ;bP
                2027 MUL    2023    2023    2038 ;cP^2
                2028 SUM    2025    2026    -2027 ;Cv[J/gK]
                2029 MUL    2024    2024        ;Tr^2
                2030 MUL    2024    2029        ;Tr^3
-0.0309430   2031 GAI    2024
0.0079340    2032 GAI    2029
0.7749880    2033 CON
-294.800E-06 2034 GAI    2030
-1.8126      2035 FWR    2024                ;Tr^
0.0120795   2036 GAI    2035
-2.8593      2037 FWR    2024                ;Tr^
382.600E-06 2038 GAI    2037
                2039 REM
;END cvn2.mac
                2040 REM
;ctt_Otis.mac [35blk]
                2041 REM
;in: m[g], V[cm3], T,Tw[K], Cv[J/gK]; out: mCv/ctt[Watt/K]
                2042 REM
;constant thermal time (Otis/Pourmovahed) [SI]
1.0000        2043 GAI    2081              ;T[K]
1.0000        2044 GAI    2009              ;Tw[K]
1.000E+06    2045 ATT    2017              ;V[cm3]
1.000E+03    2046 ATT    2019              ;m[g]
1.000E+03    2047 GAI    2028              ;Cv[J/gK]

```

```

0.0500000 2048 CON ;Dint[m]
2049 MUL 2048 2048
0.7853980 2050 GAI 2049 ;δD²/4
2.0000 2051 GAI 2050 ;δD²/2
3.1416 2052 GAI 2048 ;δD
2053 DIV 2045 2050 ;L=4V/δD²
2054 SUM 2051 2056 ;Aw
80.1808 2055 GAI 2065 ;(8/1,6151)
2056 MUL 2052 2053 ;δDL
2.5280 2057 FWR 2060
2058 MUL 2048 2054 ;AwD
2059 DIV 2045 2058 ;F
2060 DIV 2044 2043 ;Tw/T
2061 ABS 2043 -2044 ;T-Tw
2062 MUL 2073 2063 2053 ;ro2gL3(T-Tw)
2061

9.8100 2063 CON ;g
2064 MUL 2046 2053 ;mL
2065 DIV 2064 2054 ;mL/Aw
-1.7600 2066 FWR 2059
-0.3440000 2067 FWR 2062
2068 MUL 2055 2066 2057 ;const th time
2067
2069 MUL 2046 2047 ;mCv[IJ/K]
2070 DIV 2069 2071 ;mCv/ctt
1.000E-06 2071 LIM 2068 ;0(ctt)γ
1.000E+06 2072 DIV 2046 2045 ;ro[kg/m3]
2073 MUL 2072 2072 ;ro2
2074 REM
;END ctt_Dtis.mac
2075 REM
;pipi equation
0.0000 2076 VC 2019 -2008 -2083
2084 -2089
2077 SUM 2076 2078 ;u [J/g]
0.7460000 2078 GAI 2010 ;uo
2079 MUL 2019 2028 ;mCv[IJ/K]
0.0000 2080 VC 2079 -2008 -2083
2084 -2088
2081 SUM 2010 2080 ;T
2082 SUM 2081 -2009 ;T-Tw
2083 MUL 2070 2082 ;Qext
2084 IFE 2006 2004 2007 ;Q,fluxentalhy[Watt]
2085 MUL 2006 2020
1.000E+03 2086 GAI 2085 ;v·mdot[cm3s]
2087 SUM -2005 2086
2088 MUL 2087 2138 ;T(dF/dT)v - (Vdot-v·dm/dt)
2089 MUL 2087 2139 ;P - (Vdot-v·dm/dt)
2090 REM
;macro BWR_real.mac eqostate [51b1k]
2091 REM
;in: V[cm3], m[g], T[K]; out P, T(dp/dT)v [atm,MPa]
1.0000 2092 GAI 2081 ;T[K]
1.0000 2093 GAI 2019 ;m[g]
1.0000 2094 GAI 2017 ;V[cm3]
2095 REM
;gas constants
0.0820700 2096 CON ;R [atm/Kmol]
1.1925 2097 CON ;BWR-Ao
0.0458000 2098 CON ;BWR-Bo
5.889E+03 2099 CON ;BWR-Co
0.0149000 2100 CON ;BWR-a
0.0019815 2101 CON ;BWR-b
548.0640 2102 CON ;BWR-c
291.545E-06 2103 CON ;BWR-alpha
0.0075000 2104 CON ;BWR-gamma
2105 DIV 2093 2094 ;gas density [g/cm3]
35.7143 2106 GAI 2105 ;gas density [mol/l]
2107 MUL 2106 2106
2108 MUL 2106 2107
2109 MUL 2108 2108
2110 MUL 2092 2092
2111 REM
;BWR equation of state
2112 MUL 2092 2096 2106
2113 MUL 2092 2096 2098
2114 DIV 2099 2110
2115 SUM 2113 -2097 -2114
2116 MUL 2107 2115

```



```

2117 MUL 2092 2096 2101
2118 SUM 2117 -2100
2119 MUL 2118 2108
2120 MUL 2100 2103 2109
2121 MUL 2104 2107
2122 EXP -2121
2123 SUM 2121 2124
1.0000 2124 CON
2125 MUL 2102 2122 2123
2126 DIV 2125 2110
2127 MUL 2126 2108
2128 REM
;T(dP/dT)v> BWR real_gas
2129 MUL 2114 2107
2130 SUM 2129 -2127
2131 MUL 2132 2130
2.0000 2132 CON
2133 MUL 2106 2117
2134 SUM 2133 2113
2135 MUL 2107 2134
2136 SUM 2112 2116 2119 ;gas pressure [atm]
2137 SUM 2112 2127
0.1013250 2138 GAI 2137 2131 ;real gas T(dP/dT)v> [atm]
0.1013250 2139 GAI 2136 ;real gas T(dP/dT)v> [MPa]
;F[MPa]
2140 REM
;END BWR_real.mac
2141 REM
;macro polilogo.mac [18blk]
2142 REM
;estimación logarítmica índice politrópico
2143 REM
;in: V[cm^3],P[MPa]; out n[!]
1.0000 2144 GAI 2020 ;gas volumen [cm3/g]
1.0000 2145 GAI 2139 ;gas pressure [MPa]
0.0010000 2146 DEL 2145 ;DElay pressure
0.1000000
3.0000
0.0010000 2147 DEL 2144 ;DElay volumen
0.1000000
850.0000
2148 DIV 2145 2146
2149 DIV 2147 2144
2150 LOG 2148 ;log(P/Po)
2151 LOG 2152 ;log(Vo/V)
1.000E-06 2152 REL 2149 2153 2153 ;Non divide by zero
2157
1.000E-06 2153 CON
-1.0000 2154 CON
0.8000000 2155 DIV 2150 2151 ;ñ
2.2000 2156 LIM 2155 ;índice poli logo
2157 ABS 2154 2149
2158 REM
;END polilogo.mac
2159 REM
;END camara_2.mac
3001 REM
;macro masicsus.mac [55blk]
3002 REM
;in: P1,2 [MPa], v1,2 [cm3/g], T1,2 [K], u1,2 [J/g]
3003 REM
;out: mdot1,2 [kgs], fluxentropy [Watt], Dint1,2 [Watt]
1.0000 3004 GAI 1139 ;P1 [MPa]
1.0000 3005 GAI 2139 ;P2 [MPa]
1.000E+03 3006 GAI 1020 ;v1 [cm3/g]
1.000E+03 3007 GAI 2020 ;v2 [cm3/g]
1.0000 3008 GAI 1081 ;T1 [K]
1.0000 3009 GAI 2081 ;T2 [K]
1.000E+03 3010 GAI 1077 ;u1 [J/g]
1.000E+03 3011 GAI 2077 ;u2 [J/g]
3012 DIV 3005 3004 ;T1
3013 DIV 3004 3005 ;T2
3014 REM
;Constants & other parameters
1.0000 3015 CON
1.2040 3016 CON ;vN [kg/m3]
293.1500 3017 CON ;TN [K]
3018 DIV 3017 3008 ;TN1
3019 DIV 3017 3009 ;TN2
0.0022000 3020 CON ;C12[m3/s/MPa]

```

```

0.0019000 3021 CON ;C21[cm3/s/MPa]
0.3100000 3022 CON ;b1
3023 SUM 3015 -3022 ;1-b1
3024 SUM 3012 -3022 ;1-b1
3025 DIV 3024 3023
3026 MUL 3025 3025 ;[1]^2
0.3400000 3027 CON ;b2
3028 SUM 3015 -3027 ;1-b2
3029 SUM 3013 -3027 ;1-b2
3030 DIV 3029 3028
3031 MUL 3030 3030 ;[2]^2
3032 REM
;Cálculo mdot según fórmulas para CN
3033 ABS 3015 -3026
3034 ABS 3015 -3031
3035 SQT 3033 ;w12
3036 SQT 3034 ;w21
3037 SQT 3018 ;KT1
3038 SQT 3019 ;KT2
3039 IFE 3024 3035 3015
3040 IFE 3029 3036 3015
3041 MUL 3016 3020 3004 ;mdot12
3042 MUL 3016 3021 3005 ;mdot21
3038 3040
3043 REM
;Decisión
3044 SUM 3010 -3011 ;u1-u2
3045 MUL 3004 3006 ;F1v1
3046 MUL 3005 3007 ;F2v2
3047 SUM 3044 3045 -3046 ;impulsión neta
3048 SUM 3004 -3005 ;impulsión mec
3049 IFE 3048 3041 -3042 ;mdot pneu-mec
3050 MUL 3047 3051 ;arrastre irrev
3051 SUM 3049 3052 ;mdot (+)fromito2
100.000E-12 3052 R 3007 -3006 ;mdot difusion
3053 REM
;internal heat transmission: Qint1,2 [Watt]
20.000E-06 3054 R 3008 -3009 ;Qint1,2 [Watt]
3055 REM
;END masicsus.mac
0.2970000 3996 ATT 3997 ;T(gi)[K]
3997 DIV 3998 3999
3998 MUL 1139 4000 ;PVtot[J]
3999 SUM 1015 2015 ;mtot[g]
4000 SUM 1017 2017 ;Vtot[cm3]
4001 REM
;macro polilogo.mac [18blk]
4002 REM
;estimación logarítmica índice politrúpico
4003 REM
;in: V[cm^3],P[MPa]; out n[!]
1.0000 4004 GAI 4000 ;gas volumen [cm^3]
1.0000 4005 GAI 1139 ;gas pressure [MPa]
0.0010000 4006 DEL 4005 ;DElay pressure
0.1000000
3.0000
0.0010000 4007 DEL 4004 ;DElay volumen
0.1000000
850.0000
4008 DIV 4005 4006
4009 DIV 4007 4004
4010 LOG 4008 ;log(P/Po)
4011 LOG 4012 ;log(Vo/V)
1.000E-06 4012 REL 4009 4013 4013 ;Non divide by zero
4017
1.000E-06 4013 CON
-1.0000 4014 CON
0.0000 4015 DIV 4010 4011 ;n (exp)
1.000E+03 4016 LIM 4015 ;indice poli logo
4017 ABS 4014 4009
4018 REM
4100 REM
;END neumasus.mac
4500 REM
;rigidez.mac [11blk],tangente
4501 REM
;in: n[!], P[MPa], V[cm3], Ssusp[cm2]; out: Kt[daN/mm]
1.0000 4502 GAI 1139 ;P[MPa]
1.0000 4503 GAI 108 ;Ssusp[cm2]

```

```

1.0000      4504 GAI  4000      ;V[cm3]
1.0000      4505 GAI  4016      ;n[!]
0.6633000   4506 CDN                ;ratio secciones
              4507 MUL  4502  4503  4503
              4505  4506
              4508 DIV  4507  4504      ;[daN/mm]
10.0000     4509 GAI  4508      ;[N/mm] kdin
              4510 REM
;END rigidez.mac
              5001 REM
;MECANsus.***
              5011 REM
;macro Fmolla.mac [*blk]
              5012 MAX  5013  5015      ;Fmolla [100N]
              5013 SUM  5014  5016  163
20.5000     5014 GAI  9928  -5025      ;rigidez [100N/cm]
0.0000      5015 CGN
0.8500000   5016 R  -5020      ;disipaz [100Ns/cm]
              5017 REM
;END Fmolla.mac
              5019 REM
;CinDin
0.0000      5020 VC  162  5040  -5070 ;Velocidad cilindro (+asc)
0.0000      5021 VC  161  5041  -5070 ;Velocidad vástago (+desc)
              -5075
0.0000      5022 VC  160  5042  -5075 ;Velocidad émbolo (+asc)
0.0000      5025 INT  5020      ;Posición cilindro.
0.0000      5026 INT  5021      ;Posición vástago.
0.0000      5027 INT  5022      ;Posición émbolo.
              5030 MUL  93  162      ;peso cilindro,rueda [100N]
              5031 MUL  93  161      ;peso vástago +1/4veh [100N]
              5032 MUL  93  160      ;peso émbolo [100N]
              5040 SUM  5012  5061  100 ;F:TOT,cilindro
              -5030  -5062
              5041 SUM  5031  5057  100 ;F:TOT,vástago
              -5058  -5052
              5042 SUM  5055  -5032  -5053 ;F:TOT,émbolo
              5049 REM
;transformers
33.1831     5050 TF  5021      ;Q/V cámara N2 (SG).
33.1831     5051 TF  5022      ;Q/V cámara N2 (SG).
33.1831     5052 TF  1139      ;F/P cámara N2 (SG)
33.1831     5053 TF  1139      ;F/P cámara N2 (SG)
33.1831     5054 TF  5022      ;Q/V cámara A3 (SE).
33.1831     5055 TF  5080      ;F/P cámara A1 (SE)
28.2743     5056 TF  5021      ;Q/V cámara A2 (SD).
28.2743     5057 TF  5090      ;F/P cámara A2 (SD)
45.3567     5058 TF  5080      ;F/P cámara A1 (SB)
45.3567     5059 TF  5021      ;Q/V cámara A1 (SB).
28.2743     5060 TF  5020      ;Q/V cámara A2 (SD).
28.2743     5061 TF  5090      ;F/P cámara A2 (SD)
78.5398     5062 TF  5080      ;F/P cámara A1 (SA)
78.5398     5063 TF  5020      ;Q/V cámara A1 (SA).
1.0000      5070 GAI  367      ;F12 << StickSlip >>
1.0000      5075 GAI  368      ;F23 << StickSlip >>
              5079 REM
;oil pressures
              5080 SUM  5082  117      ;Presión inf. oli
              5081 DIV  153  140      ;Vin/β
0.0000      5082 VC  5081  5063  5059
              -6013  -5054
              5090 SUM  5092  117      ;Presión sup. oli
              5091 DIV  156  140      ;Vsup/β
0.0000      5092 VC  5091  6013  -5060
              -5056
              5100 REM
;END MECANsus.***
              6001 REM
;anillo60.mac [14blk]
              6002 REM
;in: Pinf,sup_oli [MPa]; out: Qamor [cm3s]
1.0000      6003 GAI  5080      ;Pinf_oli[MPa]
1.0000      6004 GAI  5090      ;Psup_oli[MPa]
              6005 SUM  6003  -6004
3.100E-06   6006 GSO  6005      ;Q,exp
0.2300000   6007 CDN
0.0019000   6008 CDN
              6009 SUM  6005  -6007
              6010 DIV  6009  6006

```

```

        6011 MAX 6006 6010 ;Q,comp
        6012 IFE 6005 6011 6006 ;Q
        6013 FIO 6012 ;Q,amor
1.0000
0.0010000
0.0000
        6014 REM
;END anillo60.mac
        9901 REM
;sollicita.mac [29b1k]
        9902 TIM ;time run
        6.2832 9903 GAI 9902 ;2δ-t
        9904 REM
;rem;no inputs; out: x[cm],ground
        9905 REM
;senoidal (Control:-1) -> Asin(2δf-t)
        9906 MUL 9903 9910 ;2δft
        9907 SIN 9906
        9908 MUL 9907 9909
        5.0000 9909 CON ;Amplitud[cm]
        1.0000 9910 CON ;f[Hz]
        9911 REM
;pulso (Control:0)
        0.5000000 9912 PLS ;ti;tf;3p:+asc,-desc
100.0000
-10.0000
        9913 REM
;combina 2 freq (Control:1)
        50.0000 9914 REL 9915 9915 9921 ;time for change
        9916 9902
        9915 MUL 9916 9917
        10.0000 9916 CON ;A1[cm]
        9917 SIN 9918
        9918 MUL 9903 9920
        0.5000000 9920 CON ;f1[Hz]
        9921 MUL 9922 9923
        5.0000 9922 CON ;A2[cm]
        9923 SIN 9924
        9924 MUL 9903 9926
        3.0000 9926 CON ;f2[Hz]
        0.0000 9927 CON ;-1:sin; 0:pulso; 1:msin
        0.0000 9928 REL 9914 9912 9908 ;control
        9927
        9929 REM
;end sollicita.mac

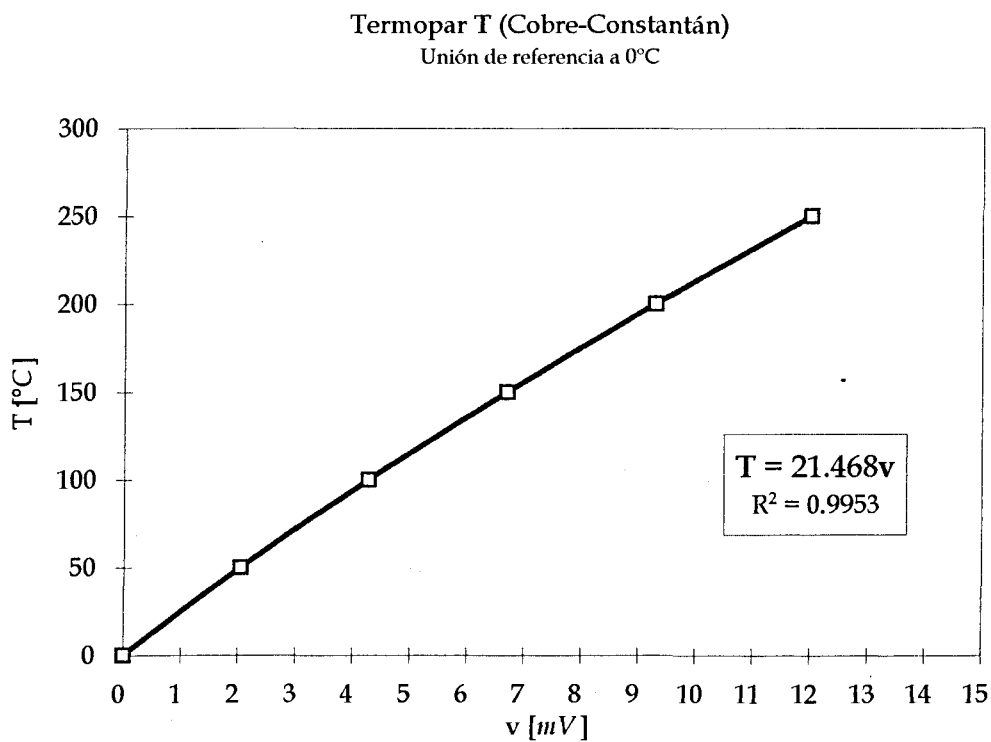
```

## Apéndice A7. CALIBRACIONES

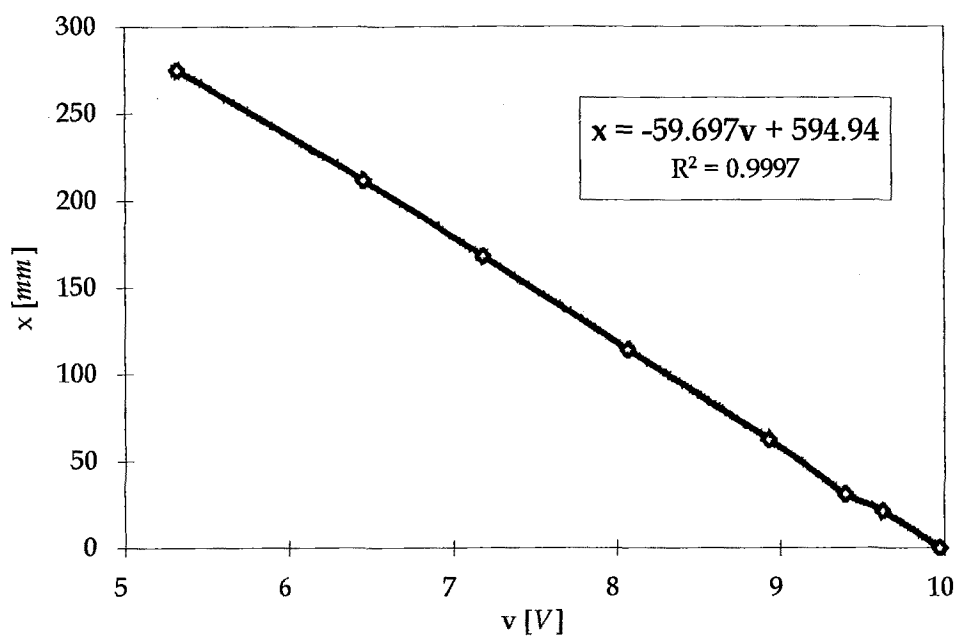
A continuación se muestran las calibraciones efectuadas de los sensores utilizados en la medida de las correspondientes señales.

El ajuste que se efectúa del termopar se basa en los datos de la unión Cobre-Constantán. Los tres termopares utilizados tienen por tanto idéntica correlación.

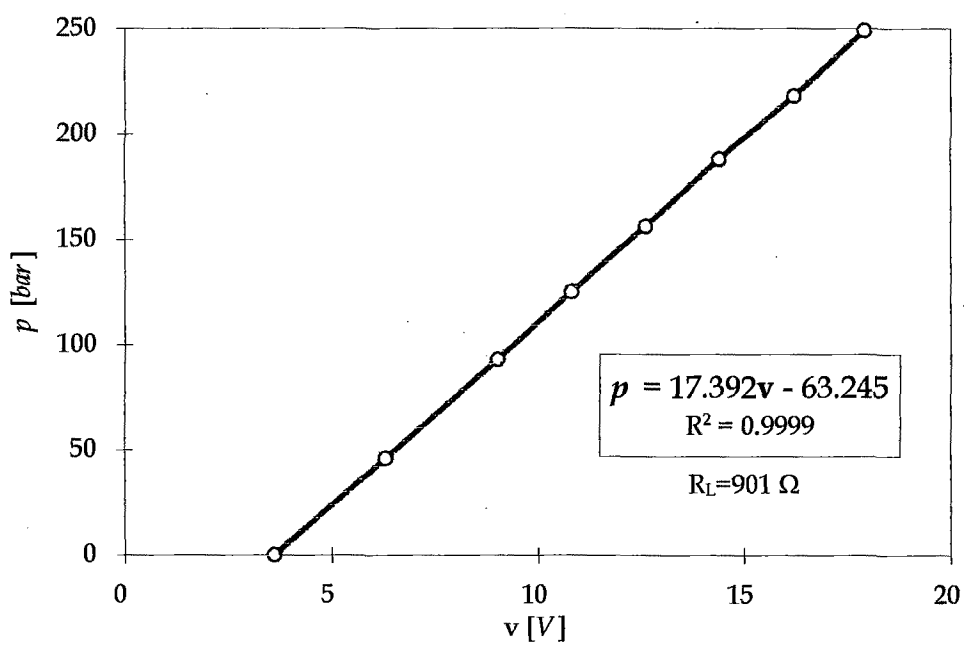
Respecto a los transductores de presión PTX-610 de Druck, se obtuvo la misma regresión para todos ellos. No se apreciaron diferencias significativas de señal al calentarse la resistencia de carga  $R_L$ .



Calibración transductor de posición Temposonics



Calibración transductor de presión PTX-610



## Bibliografía fundamental

- [1] Abdel Hady, Crolla. Active suspension control algorithms for a four-wheel vehicle model. *International Journal of Vehicle Design*, vol 13, 1992.
- [2] Abdel Hady, Crolla. Theoretical analysis of active suspension performance using a four-wheel vehicle model. *Proc Instn Mech Engrs*, vol 203 1989.
- [3] Agulló, Cardona. Anàlisi de senyals (III). Resposta dels sistemes lineals. Servei de Publicacions de la UPC, 1992.
- [4] Aungier. A fast, accurate real gas equation of state for fluid dynamic analysis applications. *Journal of Fluid Engineering*, June 1995, Vol 117.
- [5] Chalasani. Ride performance of active suspension systems - Part 1: Simplified analysis based on a quarter-car model. ASME Symposium on Simulation and Control of Ground Vehicle Transportation System. AMD-Vol 80, DSC-Vol 2, pp187-204.
- [6] Chalasani. Ride performance of active suspension systems - Part 2: Comprehensive analysis based on a full-car model. ASME ASME Symposium on Simulation and Control of Ground Vehicle Transportation System. AMD-Vol 80, DSC-Vol 2, pp187-204.
- [7] Codina, Xercavins. Flow rate characteristics of pneumatic fittings. 46th National Fluid Power Conference. pp107-111. March 1994. Anaheim LA USA.
- [8] Crolla, Abdel-Hady. Semiactive suspension control for a full vehicle model. SAE International. Passenger Car Meeting and Exposition. Nashville, Tennessee. USA. Sept 1991.
- [9] Crolla, Abouel Nour. Power losses in active and passive suspensions of off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, vol 29 1992.
- [10] Crolla, Aboul Nour. Theoritichal comparisons of various active suspension system in terms of performance and power requirements. C420/88 IMechE 1988.
- [11] Crolla, Firth, Hine, Pearce. The performance of suspensions fitted with controllable dampers. Proc Ninth IAVSD Conf. Kingston Canada (1989).
- [12] Crolla. Intelligent suspensions. *Agricultural Enginner*, Winter 1989.
- [13] Elder, Otis. Accumulators: The role of heat transfer in fluid power losses. 4th International Fluid Power Symposium, april 1975.
- [14] Foag. A practical control concept for passenger car active suspensions with pre-view. C424/88.
- [15] Hall, Gill. Performance evaluation of motor vehicle active suspension systems. *Proc Instn Mech Engrs*, vol 201 1987.

- [16] Hall, Hill. Performance of a telescopic dual-tube automotive damper and the implications for vehicle ride prediction. Proc Instn Mech Engrs, vol 200 1986.
- [17] Hall, Tang. Analysis of active and semi-active vehicle suspensions fitted with a pneumatic self-energizing levelling device. Proc Instn Mech Engrs, vol 204 1990.
- [18] Horton, Crolla. Theoretical analysis of a semi-active suspension fitted to an off-road vehicle. Vehicle System Dynamics, 15 1986.
- [19] International Standard ISO 2631/1. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Paqrt 1: General requirements. First edition 1985-05-15.
- [20] International Standard ISO 6358. Pneumatic fluid power - Components using compressible fluids -Determination of flow-rate characteristics. First edition 1989-10-01.
- [21] Jacobsen, Steward, McCarty, Hanley. Termophysical properties of Nitrogen from the fusion line to 3500R (1944K) for pressures to 150000psia (10342 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>). NBS Technical Note 648.
- [22] Karnopp, Crosby, Harwood. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. Journal of Engineering for Industry, May 1974.
- [23] Karnopp. Force generation in semi-active suspensions using modulated dissipative elements. Vehicle System Dynamics, 16 1987.
- [24] Karnopp. Permanent magnet linear motors used as variable mechanical dampers for vehicle suspensions. Vehicle System Dynamics, 18 1989.
- [25] Karnopp. Pseudo Bond Graphs for thermal energy transport. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 100 sept 1978.
- [26] Karnopp. Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol 107, March 1985.
- [27] Krasniski. Comparison of analytical and experimental results for a semi-active vibration isolator. Proceeding of the 50th Shock and Vibration Symposium, Colorado Springs, Colorado (1979).
- [28] Krasniski. The experimental performance of an "on-off" active damper. The Shock and Vibration Bulletin 51, The Shock and Vibration Information Center, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., 1980.
- [29] Langlois, Hanna, Anderson. Implementing preview control on an off-road vehicle with active suspension. The dynamics of vehicles. Supplement to Vehicle System Dynamics, vol 20. Proceedings 12th IAVSD-Symposium. Lyon, France Aug-1991
- [30] Louam, Wilson, Sharp. Optimal control of a vehicle suspension incorporating the time delay between front al rear wheel inputs. Vehicle System Dynamics.
- [31] Margolis. Semi-active control of wheel hop in ground vehicles. Vehicle System Dynamics, 12 1983.



- [32] Miller. The effect of hardware limitations on an on/off semi-active suspension. C442/88.
- [33] Otis. Getting maximum energy-savings from your accumulators. Hydraulics and Pneumatics, dec 1979.
- [34] Otis. Hydraulic accumulators as energy buffers. Thermodynamic modeling and thermal losses. Flywheel Technology Symposium, oct 1980.
- [35] Oustaloup, Moreau, Nouillant. La suspension Crone dans le domain de l'automobile: Du concept a la realisation. "L'Hydraulique et le Vehicule". S.I.A., VIème Congrès International, Mai 1994.
- [36] Oustaloup, Moreau, Nouillant. Transfer energetique d'un derivateur non entier et application en isolation vibratoire: La suspension Crone. "L'Hydraulique et le Vehicule". S.I.A., VIème Congrès International, Mai 1994..
- [37] Pourmovahed, Otis. An experimental thermal time correlation for hydraulic accumulator. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 112 march 1990.
- [38] Rakheja, Hong Su, Sankar. Analysis of a passive sequential hydraulic damper for vehicle suspension. Vehicle System Dynamics, 19 1990.
- [39] Rakheja, Sankar. Vibration and shock isolation performance of a semi-active "On-Off" damper. Transactions of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 85-DET-15 sept 1985.
- [40] Ryba. Improvements in dynamics characteristics of automobile suspension systems. Two-Mass Systems. Vehicle System Dynamics, 3 1974.
- [41] Segel, Lang. The mechanics of automotive hydraulic dampers at high stroking frequencies. Proceedings of Vehicle Systems Dynamics, 1982.
- [42] Sharma, Crolla, Wilson. The design of a fully active suspension system incorporating a Kalman filter for state estimation.
- [43] Sharp, Crolla. Intelligent suspensions for road vehicles - current and future developments. EAEC Conference on "New developments in Power Train and Chasis Engineering", Strasbourg, June 1987.
- [44] Sharp, Crolla. Road vehicle suspension system design - a review. Vehicle System Dynamics, 16 1987.
- [45] Sharp, Hassan. Performance and design considerations for dissipative semi-active suspensions systems for automobiles. Proc Instn Mech Engrs, vol 201 1987
- [46] Shoureshi, McLaughlin. Application of Bond Graphs to thermofluid processes and systems. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 107 dec 1985.
- [47] Soliman, Crolla, El-Sayed. A comparison of control strategies for the switchable damper suspension system. International Journal of Vehicle Design, vol 14, 1993.

- [48] Sun, Parker. A position controlled disc valve in vehicle semi-active suspension systems. Control Engineering Practice, vol 1 1993.
- [49] Svoboda, Bouchard, Katz. A thermal model for gas-charged accumulators based on the heat conduction distribution.
- [50] Thompson. Optimal and Suboptimal Linear Active Suspensions for Road Vehicles. Vehicle System Dynamics, 13 (1984) pp.61-72.
- [51] Wallaschek. Dynamics of non-linear automotive shock-absorbers. International Journal of Non-Linear Mechanics.

## Bibliografía suplementaria

- [52] Abd-el-Tawwad, Crolla. Theoretical prediction of the performance of switchable damper suspension systems. Proceeding of the 6th AMME Conference, May 1994.
- [53] Alleyne, Hedrick. Nonlinear adaptive control of active suspensions. IEEE Transactions on Control Systems Technology, march 1995. Vol3, n1.
- [54] Barak, Hrovat. Application of the LQG approach to design of an automotive suspension for three-dimensional vehicle models. C421/88.
- [55] Bednar. Scraper suspension acts like a variable-rate spring. Hydraulics and Pneumatics, vol 53 aug 1980.
- [56] Benedict, Schulte. A note on the critical pressure ratio across a fluid meter. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. Sept 1973.
- [57] Benedict. Generalized contraction coefficient of an orifice for subsonic and supersonic flows. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. June 1971.
- [58] Besinger, Cebon, Cole. An experimental investigation into the use of semi-active dampers on heavy lorries. Vehicle System Dynamics, Conf.
- [59] Bober, chow. Nonideal gas effects for the Venturi meter. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. Vol. 113. June 1991.
- [60] Bourcier de Carbon. Théorie mathématique et réalisation pratique de la suspension amortie des véhicules terrestres. Communication au 3<sup>e</sup> Congrès Technique International de l'Automobile. Paris-Octobre 1950.
- [61] Cech. A low-power active suspension and its bounce and cross model performance. C422/88.
- [62] Cesia. Temperaturas y presiones de inflado del cilindro de suspensión hidroneumático tipo 250-3. Publicación Cesia 250-402, octubre 1992.
- [63] Cho, Hedrick. Pneumatic actuators for vehicle active suspension applications. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 107 march 1985.
- [64] Cooper, Goldfrank. B-W-R Constants and New Correlations. Hydrocarbon Processing, Dec 1967, Vol46, n12.
- [65] Craighead. An active suspension system for an ambulance stretcher. C426/88.
- [66] Crolla, Abdel-Hady. Active suspension control performance; Performance comparisons using control laws applied to a full vehicle model. Vehicle System Dynamic, vol 20 (1991).
- [67] Crolla, Dale. Off-road vehicle ride vibration. Proc Instn Mech Engrs, 1984.

- [68] Crolla, Horton, Pitcher, Lines. Active suspension control for an off-road vehicle. Proc Instn Mech Engrs, vol 201 1987.
- [69] Crolla, Sharp. Active suspension control.
- [70] Crolla, Soliman, El-Sayed, El-Alaily. Experimental results from a slow-active suspension system. International Journal of Vehicle Design, vol 14, 1993.
- [71] Crolla. A systematic approach to vehicle design using VDAS (Vehicle Dynamic Analysis Software). SAE International. International Congres & Exposition. Detroit, Michigan. USA. Mar 1994.
- [72] Crolla. Off-road vehicle dynamics. Vehicle System Dynamics, 10 1981..
- [73] Decker, Schramm, Kallenbach. A practical approach towards advanced semi-active suspension systems. C430/88.
- [74] Deckker, Chang. Transient effects in the discharge of compressed air from a cylinder through an orifice. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. Sept 1968.
- [75] Deckker, Chang. An investigation of steady compressible flow through thick orifices. Proc Inst Mech Engrs 1965-66. Vol. 180 Pt 3.
- [76] de las Heras, Codina. Modelisation of Oleopneumatic suspensions. 46th National Fluid Power Conference. pp233-236. March 1994. Anaheim LA USA.
- [77] de las Heras, Codina. Gas compression process inside oleopneumatic suspensions. 47th National Fluid Power Conference. pp11-18. April 1996. Chicago USA.
- [78] de las Heras, Codina. Aspectos de control para suspensiones inteligentes. Pendiente de publicación.
- [79] Doi, Yasuda, Hayashi. An experimental study of optimal vibration adjustment using adaptive methods. C433/88.
- [80] Dunbar. Practical comparison of rigid axles and independent suspension on off-road vehicles. C466/002/93.
- [81] Ellis, Guenther, Maalej. Suspension derivatives in vehicle modelling and simulation. International Journal of Vehicle Design, vol 10, 1989.
- [82] Ellis, Guenther, Maalej. Suspension derivatives of a kinematic suspension model. International Journal of Vehicle Design, vol 10, 1989.
- [83] Félez, Vera. Bond Graph assisted models for hydro-pneumatic suspensions in Crane-vehicles. Vehicle System Dynamics, 16 1987.
- [84] Fodor, Redfield. The variable linear transmission for regenerative damping in vehicle suspension control. Vehicle System Dynamics, 22 1993.
- [85] Fukushima, Hidaka, Iwata. Optimum characteristics of automotive shock absorbers under various driving conditions and road surfaces. International Journal of Vehicle Design, vol 4, 1983.

- [86] Goodall, Kortüm. Active controls in ground transportation - a review of the state-of-the-art and future potential. Vehicle System Dynamics, 12 1983.
- [87] Green. The effects of discharge times on the selection of gas charged hydraulic accumulators. 3th International Fluid Power Symposium. May 1973.
- [88] Hedrick, Butsuen. Invariant properties of automotive suspensions. C423/88.
- [89] Hernecke, Zieglmeier. Frequency dependent variable suspension damping-theoretical background and practical success. C431/88.
- [90] Hickson, Ross-Martin, Darling. Hydraulic systems modelling within automotive applications. "L'Hydraulique et le Vehicule". S.I.A., VIème Congrès International, Mai 1994
- [91] Hiller, Schmitz. Modellierung des Antriebsstrangers eines frontgetriebenen Pkw im Rahmen eines Gesamtfahrzeugmodells. Zeitschrift for Angewandte mathematiz und mechanic, 1991.
- [92] Hine, Pearce. A practical intelligent damping system. C436/88.
- [93] Hrovat, Hubbard. Optimum vehicle suspensions minimizing RMS rattlespace, sprung-mass acceleration and jerk. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 103 sept 1981.
- [94] Hrovat, Margolis. An experimental comparison between semiactive and passive suspensions for air-cushion vehicles. International Journal of Vehicle Design, vol 2, 1981.
- [95] Jolly. Study of ride comfort using a nonlinear mathematical model of vehicle suspension. International Journal of Vehicle Design, vol 4, 1983.
- [96] Jonsson. Simulation of dynamical behaviour of a front wheel suspension. Vehicle System Dynamics, 20 1991.
- [97] Julien. Dynamique de la voiture automobile. Dynamique des systèmes pendulaires. Societe des Editions Technip.
- [98] Karnopp. Active suspensions based on fast load levelers. Vehicle System Dynamics, 16 1987.
- [99] Karnopp, Margolis y Rosenberg. System dynamics. A Unified Approach. Ed. Wiley & Sons, 1990.
- [100] Kyongsu Yi, Hedrick. Dynamic tyre force control by semiactive suspensions. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 115 sept 1993.
- [101] Landaluze, Calzada, Reyero. Aspectos de control para suspensiones activas y semiactivas. Automática e Instrumentación, jun 1990
- [102] Lee, Hedrick. Dynamic constraint equations and their impact on active suspension performance. Vehicle System Dynamics, Conference pp357-367.

- [103] Lich. The effect of bandwidth of semiactive dampers on vehicle ride. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 115 sept 1993
- [104] Lijima, Akatsu, Takahashi, Murakami. Development of a Hidraulic Active Suspension. Nissan Motor Co., Ltd.931971.
- [105] Liming, Yi. Digital simulation and experimental research on energy efficiency of rubber bag accumulators.
- [106] Lin, Kortüm. Identification of system physical parameters for vehicle system with nonlinear components. The dynamics of vehicles. Supplement to Vehicle System Dynamics, vol 20. Proceedings 12th IAVSD-Symposium. Lyon, France Aug-1991.
- [107] Lizell. Semi-active damping. C429/88.
- [108] Lohmann. Application of model order reduction to a hydropneumatic vehicle suspension. IEEE Transactions on Control Systems Technology, march 1995. Vol3, n1.
- [109] Lugner, Mittermayr, Endlicher. Theoretical investigations on the behaviour of a car with additional four-wheel steering at  $\mu$ -split conditions.C440/88.
- [110] Maclaurin, Hall.The effects of controllable double differential on the handling and a traction properties of 4 x 4 vehicle. C466/010/93.
- [111] Mare, Berthe. La synthese d'amortisseurs oleopneumatiques a hautes performances. "L'Hydraulique et le Vehicule". S.I.A., VIème Congrès International, Mai 1994.
- [112] Margolis, Karnopp. Bond Graphs for flexible multibody systems. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 101 march 1979.
- [113] Margolis, Karnopp. Teaching of physical system dynamics at UC Davis. The Art of Physical System Modeling, ASME 1991.
- [114] Margolis, Yang. Bond Graph models for fluid networks using modal approximation. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 107 sept 1985.
- [115] Margolis. Analytical modelling of helycal screw turbines for performance prediction. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, vol 100 july 1978.
- [116] Margolis. Bond Graph for vehicle stability analysis. International Journal of Vehicle Design, vol 5, 1984.
- [117] Margolis. Semi-active heave and pitch control for ground vehicles. Vehicle System Dynamics, 11 1982.
- [118] Mastinu. Passive automobile suspension parameter adaptation. C425/88.
- [119] Meller, Boge. Variable damping-philosophy and experiences of a preferred system. C432/88.

- [120] Miller, Ahmadian, Nobles, Swanson. Modelling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator. Transactions of the ASME, Vol 117, July 1995.
- [121] Milwitzky, Cook. Analysis of landing-gear behavior. Report 1154, Langley Aeronautical Laboratory.
- [122] Mo. Analysis of compressed air flow through a spool valve. Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Engineering Science, vol 203 1989.
- [123] Moore. Linear variable inductance position transducer for suspension system. C428/88.
- [124] Mouri, Kuroki, Sugawara, Irie. Handling and stability improvement achieved with four-wheel steering. C441/88.
- [125] Nakamoto. Effect of four-wheel steering system on vehicle yawing motion. C439/88.
- [126] Olivari. Elección del acumulador mediante ordenador. Fluidos 199, Jul/Ago 1994.
- [127] Pacejka, E. Bakker. The magic formula tyre model. Vehicle System Dynamics, Conference.
- [128] Paynter, Fahrenthold, Rotz. Wall heat transfer and storage effects on the thermal dynamics of Otis-effect gas compression processes. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 112 dec 1990.
- [129] Pourmovahed, Otis. Effects of thermal damping on the dynamic response of a hydraulic motor-accumulator system. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol 106 march 1984.
- [130] Poyser. Development of a computer controlled suspension system. International Journal of Vehicle Design, vol 8, 1987.
- [131] Rajamani, Hedrick. Adaptative observers for active automotive suspensions: theory and experiment. IEEE Transactions on Control Systems Technology, march 1995. Vol3, n1.
- [132] Rajamani, Hedrick. Semi-active suspensions. A comparison between theory and experiments. The dynamics of vehicles. Supplement to Vehicle System Dynamics, vol 20. Proceedings 12th IAVSD-Symposium. Lyon, France Aug-1991.
- [133] Rakheja, Ahmed. Simulation of non-linear variable dampers using energy similarity. Engineering Computations, vol 8 1991.
- [134] Redfield, Karnopp. Optimal performance of variable component suspensions. Vehicle System Dynamics, 17 1988.
- [135] Rosam, Darling. Modelling and testing of the interconnected hydragas suspension. "L'Hydraulique et le Vehicule". S.I.A., VIème Congrès International, Mai 1994.
- [136] Ryba. Semi-active damping with an electromagnetic force generator. Vehicle System Dynamics, 22 1993.

- [137] Samir. Fully active system with and without preview. Chapter two, Digital controlled slow-active suspension systems. PhD thesis -draft- (1994).
- [138] Samir. Hydro-pneumatic slow active system. Chapter three, Digital controlled slow-active suspension systems. PhD thesis -draft- (1994).
- [139] Samir. Signal processing and digital controller design. Chapter five, Digital controlled slow-active suspension systems. PhD thesis -draft- (1994).
- [140] Schulz, Schwendig. Wärmeübergang in Rohren bei aufgeprägter, periodischer Kompression/Espansion. Zeitschrift for Angewandte mathematiz und mechanic, 1993.
- [141] Sekiguchi, Asami. Fundamental investigation of an oil damper. 1st report. Case of its analysis as steady flow. Butlletin of the JSME, vol 25 july 1982.
- [142] Sekiguchi, Asami. Fundamental investigation of an oil damper. 2nd report. Analysis based on the unsteady flow. Butlletin of the JSME, vol 26 may 1983.
- [143] Sekiguchi, Asami. Fundamental investigation of an oil damper. 3rd report. Comparison of analysis based on cylindrical coordinates and cartesian coordinates. Butlletin of the JSME, vol 27 feb 1984.
- [144] Sekiguchi, Asami. Measurement of large damping. Butlletin of the JSME, vol 25 june 1982.
- [145] Sen, Bolukbasi, Chase. Test analysis of an advanced technology landing gear. Journal of the American Helicopter Society.
- [146] Senger. A velocity dependent steering gear rato for four-wheel steered vehicles. C438/88.
- [147] Sharma, Crolla, Wilson. Derivation of a control law for a 3 state switchable damper suspension system for improving road vehicle ride characteristics.
- [148] Sharp, Crolla. Controlled rar steering for cars-a review. C437/88.
- [149] Sharp, Hassan. On the performance capabilities of active automobile suspension systems of limited bandwidth. Vehicle System Dynamics, 16 1987.
- [150] Sueur, Dauphin-Tanguy. Bond-Graph approach for structural analysis of MIMO linear systems. Journal of the Franklin Institute, 1991.
- [151] Stayner. Suspensions for agricultural vehicles. C435/88.
- [152] Sugasawa, Irie, Kuroki. Development of simulator vehicle design for conducting vehicle dynamics research. International Journal of Vehicle Design, vol 13, 1992.
- [153] Sullivan. Historical review of Real-Fluid isentropic flow models. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. Vol. 103, June 1981.
- [154] Thoma. Fondamenti dei bondgraph. Oleodinamica Pneumatica -5/82.
- [155] Thoma. Hydropneumatic accumulator for vehicle suspension. Comunicación particular, 921208.



- [156] Thoma. Simulation by BondGraphs. Introduction to a Graphical Method. Ed. Springer-Verlag, 1990.
- [157] Timoney, Timoney. Heavy vehicle independent suspension. C434/88.
- [158] Timoney, Timoney. Off-road tests of an independently sprung airport fir truck and a handling comparison with beam axle vehicles. C466/013 IMechE 1993.
- [159] Verhnel, Pacejka. Bond Graph based modelling using macros, an introduction to the program Bamms. Vehicle System Dynamics, Conference.
- [160] Virto. Mecànica de Fluids. Fonaments I. Edicions UPC. 1993.
- [161] Wahi. Oil compressibility and polytropic air compression analysis for oleopneumatic shock struts. Journal Aircraft, vol 13 july 1976.
- [162] Wark. Termodinámica. Ed Mc Graw Hill,1990.
- [163] Wilkinson, Crolla. Synthesis and analysis of a passive alternative to active suspension.C466/044/93.
- [164] Zeid, Chung. Bond Graph modeling of multibody systems: a library of three-dimensional joints. Journal of The Franklin Institute, vol 329, n4, pp 605-636. 1992.
- [165] Zisielewski. Damping of low-frequency vibrations in vehicles by mechanically controlled systems. Zeitschrift for Angewandte mathematiz und mechanic, 1992.







