



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR*  
Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

**IMPLEMETACIÓN Y PUESTA  
EN MARCHA DE UN  
SISTEMA  
HIDRONEUMÁTICO PARA  
ESTUDIO DE CRECIMIENTO  
DE GRIETAS EN PROBETAS  
PLANAS EMPLEANDO UN  
PUENTE DE CARGA BIAXIAL**

**Alumno: Álvaro Garzón Casado**

Tutor: Prof. D. Francisco A. Díaz Garrido  
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

**Junio, 2015**



Universidad de Jaén  
Escuela Politécnica Superior de Jaén  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don FRANCISCO ALBERTO DÍAZ GARRIDO, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: IMPLEMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO PARA ESTUDIO DE CRECIMIENTO DE GRIETAS EN PROBETAS PLANAS EMPLEANDO UN PUENTE DE CARGA BIAXIAL, que presenta ÁLVARO GARZÓN CASADO, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, JUNIO de 2015

El alumno:

El tutor:

ÁLVARO GARZÓN CASADO

FRANCISCO A. DÍAZ GARRIDO

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| ÍNDICE GENERAL .....                                                              | 2  |
| Objeto del proyecto .....                                                         | 3  |
| Motivación .....                                                                  | 4  |
| Justificación .....                                                               | 4  |
| 1. Introducción histórica y problemas asociados a la mecánica de la fractura..... | 7  |
| 1.1. Hasta la Edad Contemporánea (- 1920) .....                                   | 7  |
| 1.2. Edad Contemporánea y Griffith (1920-1950) .....                              | 8  |
| 1.3. Modificación de Irwin (1950 – 1961).....                                     | 12 |
| 1.4. Factores K y Ley de Paris (1961 -).....                                      | 12 |
| 2. Técnicas experimentales de medición de tensiones y deformaciones.....          | 18 |
| 2.1. Fotoelasticidad.....                                                         | 18 |
| 2.2. Correlación digital de imágenes (DIC) .....                                  | 22 |
| 2.3. Extensometría eléctrica .....                                                | 24 |
| 3. Antecedentes y evolución del proyecto.....                                     | 27 |
| 4. Memoria descriptiva .....                                                      | 34 |
| 4.1. Descripción de componentes y software.....                                   | 34 |
| 4.1.1. Fuente de alimentación .....                                               | 34 |
| 4.1.2. Electroválvulas .....                                                      | 34 |
| 4.1.2.1. Electroválvula 3/2.....                                                  | 34 |
| 4.1.2.2. Electroválvula 5/3.....                                                  | 36 |
| 4.1.2.3. Transductor de presión electroneumático (ITV) .....                      | 37 |
| 4.1.3. Acondicionamiento de aire .....                                            | 38 |
| 4.1.3.1. Filtro de aire .....                                                     | 38 |
| 4.1.3.2. Válvula de paso .....                                                    | 39 |
| 4.1.3.3. Regulador de presión.....                                                | 40 |
| 4.1.4. Conversión – multiplicación hidroneumática.....                            | 41 |
| 4.1.4.1. Transformador hidroneumático.....                                        | 41 |
| 4.1.4.2. Multiplicador de presión hidroneumático .....                            | 41 |
| 4.1.5. Sistema de adquisición de datos .....                                      | 42 |

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.5.1. Célula de carga .....                                                          | 42  |
| 4.1.5.2. Acondicionamiento de la señal .....                                            | 43  |
| 4.1.5.3. Tarjeta Arduino .....                                                          | 43  |
| 4.1.5.4. Módulo de relés .....                                                          | 44  |
| 4.1.6. Software de control .....                                                        | 45  |
| 4.1.6.1. Calibración .....                                                              | 54  |
| 4.2. Descripción de Set-ups, conexiones y funcionamiento .....                          | 57  |
| 4.3. Ensayos .....                                                                      | 64  |
| 4.3.1. Metodología y equipos .....                                                      | 64  |
| 4.3.2. Resultados .....                                                                 | 69  |
| 4.3.3. Conclusiones .....                                                               | 79  |
| 4.3.4. Líneas de trabajo futuras .....                                                  | 80  |
| 5. Presupuesto .....                                                                    | 82  |
| 5.1. Partida correspondiente a COMPONENTES DE ADAPTACIÓN A MODO DE CARGA DINÁMICA ..... | 82  |
| 5.2. Partida correspondiente a FABRICACIÓN DE MORDAZAS DE CUÑA .....                    | 83  |
| 5.3. Presupuesto final .....                                                            | 84  |
| Anexo I: Planos .....                                                                   | 86  |
| Anexo II: Hojas de características .....                                                | 88  |
| Anexo III: Calibración del banco de ensayo .....                                        | 98  |
| III.1. Calibración de la célula de carga .....                                          | 98  |
| III.2. Calibración de la electroválvula proporcional .....                              | 99  |
| III.3. Calibración de modo estático .....                                               | 101 |
| III.4. Calibración de modo dinámico .....                                               | 104 |
| Anexo IV: Aplicación de seguimiento de grieta .....                                     | 119 |
| IV.1. Ensayo de contraste de luz .....                                                  | 129 |
| Anexo V: Software de control del banco de ensayo .....                                  | 133 |
| Anexo VI: Fuentes y bibliografía .....                                                  | 151 |

## OBJETO DEL PROYECTO

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



El objeto del presente proyecto es la implementación y puesta en marcha de un sistema hidroneumático para el análisis de crecimiento de grietas en probetas planas mediante técnicas experimentales en ensayos monoaxiales. También se desarrolla el software de control y análisis del sistema en lenguaje MatLab, empleando como interprete una tarjeta Arduino Mega 2560.

Se emplea como base un banco de ensayos de tracción biaxiales para probetas planas resultado de un proyecto fin de carrera realizado con anterioridad. Se emplean de éste todo el armazón, el cilindro hidráulico vertical y todo el sistema de control, aunque de éste ultimo sólo se emplee la parte de acondicionamiento de la señal, explicado más exhaustivamente más adelante.

## **MOTIVACIÓN**

La realización de este trabajo se ve motivada, en primera instancia, por el carácter obligatorio de la realización del Trabajo Fin de Grado para poder obtener el título de Graduado en Ingeniería Mecánica. Como motivación secundaria cabe destacar el deseo propio del autor de la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el transcurso del grado, impartidos en materias de amplia diversidad, especialmente en la asignatura de Integridad estructural en elementos mecánicos.

## **JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo e implementación de este sistema se justifica debido al requerimiento del Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén de poseer y disponer de un equipo destinado a los fines antes mencionados, así como poder ser usado como herramienta educativa en las sesiones prácticas de las asignaturas que así lo requieran sin necesidad de emplear un equipo mayor o más costoso (fig. 1).





Figura 1: Banco de ensayos de fatiga de casa comercial [1]

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



# Introducción histórica y problemas asociados a la mecánica de la fractura

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## 1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA Y PROBLEMAS ASOCIADOS A LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

En primera instancia nos detendremos momentáneamente en el estudio de la mecánica de la fractura, pilar central del actual Trabajo Fin de Grado, desde una perspectiva histórica [2], analizando tanto los avances científicos en dicho campo como los problemas causados por el mismo.

### 1.1. Hasta la Edad Contemporánea (- 1920)

Las antiguas construcciones estaban diseñadas para soportar cargas a compresión y construidas con materiales frágiles como ladrillo o piedra, muy débiles ante cargas de tracción. La forma de las construcciones también era un motivo por el cuál no aparecía fractura: arcos (fig. 2) y cúpulas (fig. 3) eran de uso común en tales épocas.

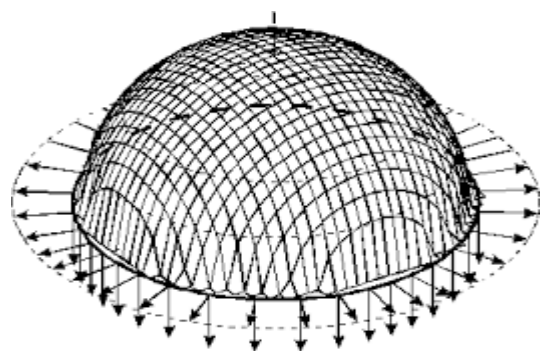
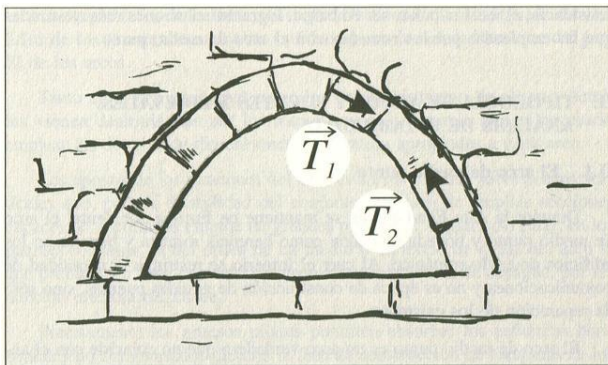


Figura 2: Cargas de compresión en arco [3]      Figura 3: Cargas de compresión en bóveda [4]

Pero cuando se empezó a emplear acero como elemento estructural, y por tanto crear estructuras que trabajaban ante cargas de tracción, comenzaron a aparecer problemas, tales como la fractura de los elementos constructivos. Claro ejemplo de estos problemas es el conocido como Desastre de la melaza de Boston de 1919 [5] (fig. 4), donde un depósito de 15 metros de altura y más de un centímetro de espesor que albergaba alrededor de 8 millones de litros de melaza en

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





su interior fracturó provocando la muerte de 21 personas e hiriendo a más de un centenar.



Figura 4: Purity Distilling Company, Boston (1919) [5]

## 1.2. Edad Contemporánea y Griffith (1920-1950)



Figura 5: A.A. Griffith [6]

No sería hasta la década de 1920 cuando el ingeniero aeronáutico inglés Alan Arnold Griffith (1893 - 1963) [2] estableciera un balance de energía consistente en el equilibrio entre la disminución de energía potencial debida al alargamiento de la grieta del cuerpo traccionado y el aumento de energía superficial debido al aumento de superficie de la grieta (ecuación (1)).



$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0 \quad (1)$$

Donde:

$dA$  = incremento diferencial del área de la grieta.

$E$  = energía total.

$\Pi$  = energía potencial.

$W_s$  = trabajo requerido para la creación de nuevas superficies en la grieta.

Desarrollando cada parte del balance de energía por separado, y reordenando términos, Griffith enunció la carga de fractura para materiales perfectamente frágiles (ecuación (2)).

$$\sigma_f = \left( \frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Donde:

$\sigma_f$  = tensión de fractura.

$E$  = módulo de Young del material.

$\gamma_s$  = energía superficial.

$a$  = semilongitud de grieta.

Los resultados de Griffith fueron relativamente ignorados debido a la ligera plasticidad que aparecía en los frentes de grieta, lo cual no satisfacía sus hipótesis de partida. Debido a ello, más catastrofes se sucedieron en dichos años, como durante la Segunda Guerra Mundial, cuando, como consecuencia de la necesidad



urgente de buques, los astilleros navales americanos decidieron adoptar la técnica de fabricación de cascos de buque enteramente soldados, como novedad frente a la tecnología tradicional de construcción roblonada. Esta nueva serie de buques recibió el nombre de Liberty, y alrededor del 52 % de los buques fabricados sufrieron problemas derivados de la fractura, como el S.S. Schenectady, que fracturó catastróficamente el 16 de enero de 1943 (fig. 6).

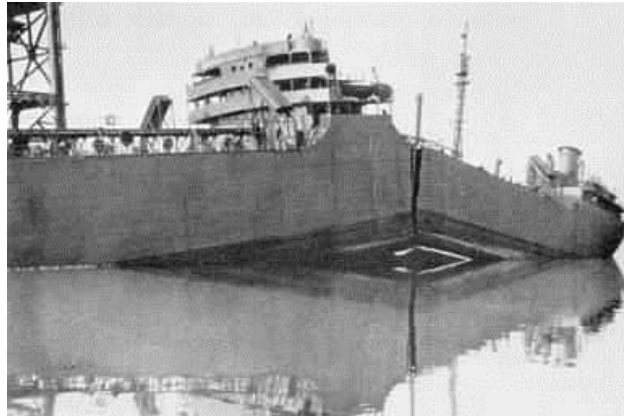


Figura 6: S.S. Schenectady [2]

La ingeniería civil tampoco se libraría de estos desastres, tal y como pudieron comprobar en Bélgica en marzo de 1936, con la caída del Hasselt Road Bridge sobre Albert Canal [7] dos años después de la finalización de sus obras (fig. 7). En este caso el fallo vino provocado por la falta de consideración del aumento de la tenacidad de fractura con la temperatura, lo que originó puntos de concentración de tensiones residuales demasiado grandes en las uniones soldadas del puente.



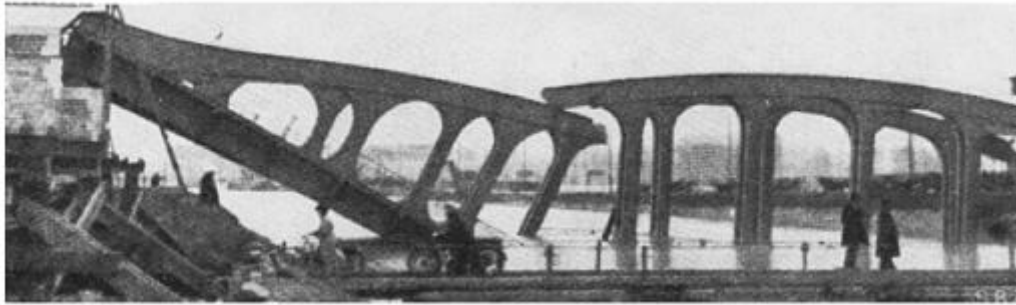


Figura 7: Hasselt Road Bridge [7]

En industria aeronáutica cabe comentar el caso del de Havilland Comet [8], avión comercial de desarrollo británico. El gran tamaño de sus ventanas fue una de las grandes innovaciones que introdujo en el mercado. Pero, tras una gran cantidad de ciclos de presurizado-despresurizado pudo comprobarse como el fuselaje llegaba a explotar, debido a las grietas que comenzaban formandose alrededor de las esquinas de las grandes ventanas rectangulares (fig. 8).

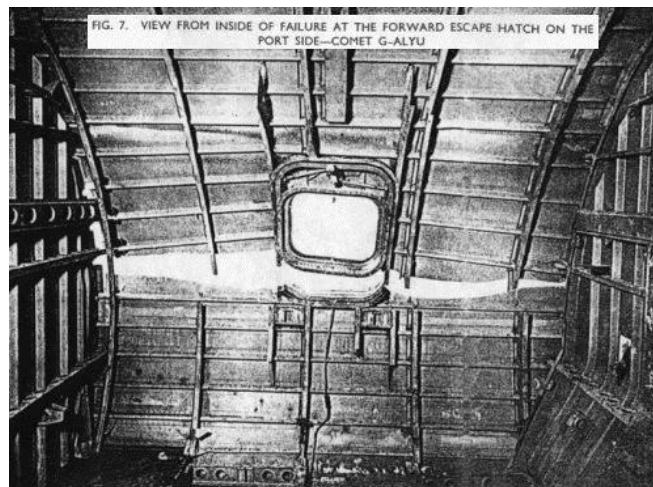


Figura 8: Detalle de ventana de un de Havilland Comet [9]

Otros numerosos fallos en la industria aeronáutica, en relación con los trenes de aterrizaje y en los motores, se han atribuido a fatiga y a corrosión bajo tensión y en el caso de los fallos del F-11 se dedujo que las fracturas frágiles se debían a la presencia de grietas preexistentes. Los fallos en el perno del motor de los DC-10 que ocasionaron varios accidentes aeronáuticos catastróficos y el espectacular



accidente del transbordador espacial Challenger del año 1986 son algunos de los últimos ejemplos de accidentes actuales.

### 1.3. Modificación de Irwin (1950 – 1961)



Vistos los problemas que se seguían sucediendo a causa de la fractura de los materiales se hizo necesaria la formulación de una modificación de la ecuación de Griffith que englobara materiales con fluencia, especialmente los metales.

Sería George Rankine Irwin [2], científico norteamericano, quien formulase la modificación a los resultados de Griffith de tres décadas atrás.

Incluyendo un término que tuviese en cuenta la carga plástica del trabajo, reformuló la ecuación

Figura 9: George Rankine Irwin [10]

de la siguiente forma:

$$\sigma_f = \left( \frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (3)$$

En dicha ecuación,  $\gamma_p$  representa el trabajo plástico por unidad de área producido, el cuál suele ser mayor que  $\gamma_s$ .

### 1.4. Factores K y Ley de Paris (1961 -)

Los factores de intensificación de tensiones, o factores K, fueron creados antes la necesidad de establecer un criterio para el análisis de la fractura [2].

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



En la figura 10 podemos observar un elemento cerca del vértice de la grieta en un material elástico, junto a una tensión plana aplicada sobre el propio elemento. Nótese que cada componente de la tensión es proporcional a una simple constante  $K_I$ . Si esta constante es conocida, la distribución de tensiones en el frente de grieta en su totalidad puede ser formulado con las ecuaciones 4, llamadas ecuaciones de Westergaard. A esta constante es a la que llamamos Factor de Intensificación de Tensiones (o SIF, por sus siglas en inglés), la cual caracteriza completamente las condiciones en el frente de grieta en un material elástico.

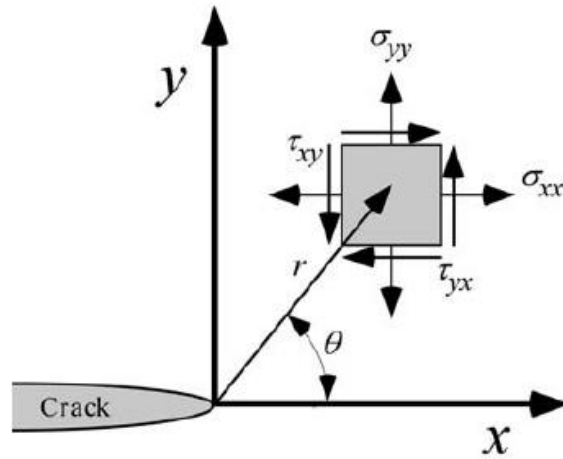


Figura 10: Distribución de tensiones en el frente de grieta [2]

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$



Donde:

$\sigma_{xx}$  = tensión en el eje x

$\sigma_{yy}$  = tensión en el eje y

$\tau_{xy}$  = tensión tangencial en el plano xy

$K_I$  = fator de intensificación de tensiones

$\theta$  y  $r$  = coordenadas polares respecto al frente de grieta

Asumiendo que el material falla localmente por una combinación crítica de tensión y deformación, podemos enunciar un valor de tensión crítica  $K_{Ic}$ . Este valor es el que conocemos como tenacidad de fractura.

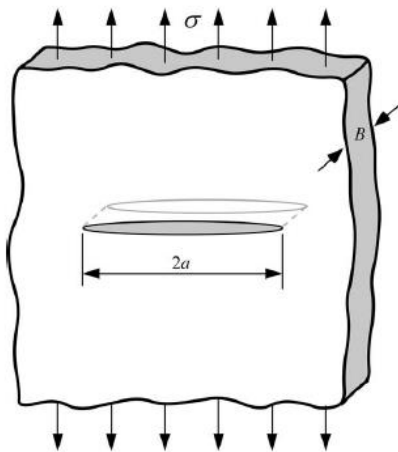


Figura 11: Elemento plano sometido a tensión remota [2]

En un componente plano como el de la figura 11 podemos definir el factor de intensificación de tensiones como:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

Donde  $\sigma$  representa la tensión remota aplicada al componente.

En 1960, pese a la reticencia de la comunidad ingenieril a abandonar el uso de sus curvas S-N a favor de un método de aproximación más riguroso para el diseño centrado en la fatiga, Paul C. Paris formuló la ley que lleva su nombre (ecuación (6)), en la que relacionaba la velocidad de crecimiento de una grieta con el intervalo de tensiones aplicado, ayudándose de un diagrama (fig. 12) en escala logarítmica que enfrenta los dos parámetros mencionados anteriormente.





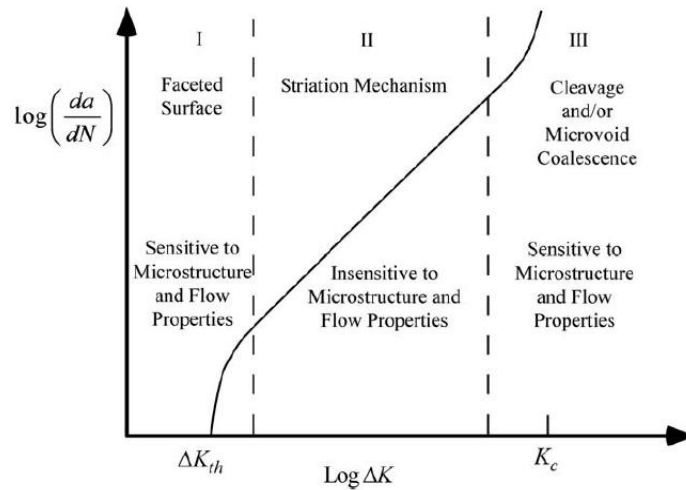


Figura 12: Diagrama de la Ley de Paris [2]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

Donde:

$da/dN$  = velocidad de propagación de grieta en función de los ciclos de fatiga.

$C$  = coeficiente que depende del rango de tensiones aplicado.

$m$  = pendiente de la curva en la región II. Es mayor por lo general en materiales con fractura frágil.

$\Delta K$  = intervalo de factores de intensificación de tensiones aplicado. Por la propia definición de este parámetro podemos decir que es el intervalo de tensiones aplicado.

El diagrama puede ser dividido en tres partes:

- 1- Región 1: es la región más cercana a la zona umbral e indica un valor  $\Delta K_{TH}$ , bajo el cuál no hay propagación de grieta. El crecimiento de grieta en esta región está dominado por la microestructura, la tensión principal y el ambiente.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





- 2- Región 2: aquí el diagrama muestra una relación lineal entre  $\log(da/dN)$  y  $\log(\Delta K)$ , por lo que podemos aplicar la Ley de Paris. Esta región corresponde a un crecimiento de grieta macroscópico estable. El ambiente y la temperatura pueden modificar la Ley de Paris. La frecuencia y los efectos por el espesor son secundarios frente a los efectos ambientales (corrosión y temperatura).
- 3- Región 3: aquí poco incremento de grieta es debido a la fatiga. Esta región está controlada principalmente por la tenacidad a fractura  $K_{IC}$ . El espesor tiene mucha más influencia en esta región:
- Una alta tenacidad a fractura es deseable por el tamaño final de la grieta.
  - Esto permite menos cantidad de inspecciones a la par que mayor facilidad en las mismas, y por lo tanto componentes más seguros.



# TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para  
Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## 2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

Hoy en día existen diversos y distintos métodos de medición de las tensiones y deformaciones obtenidas en un determinado ensayo, pudiendo hacer distintas clasificaciones de dichos métodos. Para el proyecto que nos ocupa haremos la simple división entre métodos según su alcance:

- Métodos puntuales: sólo se puede obtener información en un punto en concreto de la pieza ensayada. Es el caso de la extensometría eléctrica, dónde obtendremos información allí donde tengamos colocada la galga extensométrica.
- Métodos de campo completo: podemos obtener información de la totalidad de la pieza a ensayar, si bien son unos datos que deberán ser tratados a posteriori. En esta categoría se engloban métodos como la fotoelasticidad y la correlación digital de imágenes o DIC por sus siglas en inglés.

### 2.1. Fotoelasticidad

La velocidad de la luz depende de las características ópticas del medio en el que se propaga. Usualmente, la velocidad de la luz en un medio material se suele relacionar con el que tiene en un medio de referencia. El índice de refracción, que mide la anterior relación entre las velocidades, se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (300.000 km/s) y la velocidad en el medio material que se considera. Un medio material se define como ópticamente homogéneo e isótropo cuando su índice de refracción es el mismo en cualquier punto del sólido y, además, su valor es independiente de la dirección del rayo luminoso que lo ilumina.



Algunos materiales exhiben una curiosa propiedad denominada doble refracción o birrefringencia. En este tipo de materiales el índice de refracción depende de la orientación relativa del vector campo eléctrico respecto del material considerado. Existen materiales no cristalinos, tales como resinas sintéticas, baquelita, etc., que cuando están libres de tensión presentan propiedades ópticas de carácter isótropo; es decir, el índice de refracción  $n_0$  ( $n_0 = c/v$ , donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz en el vacío y  $v$  es la velocidad de propagación en el medio considerado) es independiente de cualquiera que sea la dirección considerada dentro del medio material. Sin embargo, cuando los citados materiales se encuentran sometidos a un estado tensional se vuelven anisótropos, presentando un índice de refracción que depende de cual sea la dirección considerada.

Si suponemos un estado de tensión plana en un punto del material podemos reducir las leyes de Maxwell para las direcciones principales en la siguiente ecuación:

$$n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7)$$

Donde:

$n_{1,2}$  = índices de refracción en las direcciones principales.

$\sigma_{1,2}$  = tensiones principales.

$C$  = constante fotoelástica del material, determinada de manera experimental y dependiente de la longitud de onda de la luz incidente y de la temperatura.

La ecuación anterior (7) se conoce como ley de Brewster y constituye la relación básica de la fotoelasticidad [11].



El vector campo eléctrico,  $E$ , de la luz es ortogonal a la dirección de propagación. En general (luz no polarizada) la dirección de  $E$  cambia en un punto considerado a lo largo del tiempo. Si la luz se encuentra polarizada linealmente el vector  $E$  siempre se encuentra contenido en el mismo plano. Si la luz se encuentra polarizada circularmente, el extremo del vector  $E$  va describiendo, a medida que avanza el tiempo y la luz se propaga, una circunferencia.

Para la realización de los ensayos de fotoelasticidad se requiere de un polarizador y un analizador, láminas delgadas que convierten la luz sin polarizar en luz polarizada linealmente según una dirección que se denomina eje del polarizador o analizador, respectivamente. Estos instrumentos pueden ser llamados en su conjunto como polariscopios. Los hay de dos tipos: el polariscopio plano y el

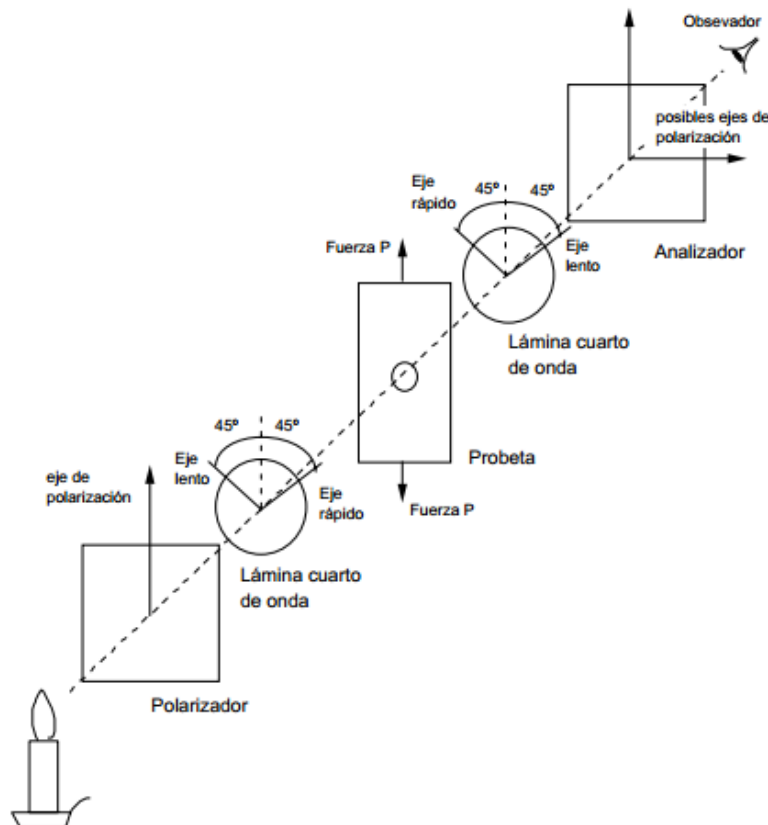


Figura 13: Esquema de polariscopio circular



polariscopio circular. Explicaremos a continuación el funcionamiento del segundo de ellos, ya que engloba por su naturaleza al primero (fig. 13).

La luz producida por un foco luminoso se polariza a través de un polarizador lineal cuyo eje de polarización queda dibujado verticalmente. La luz linealmente polarizada incide sobre una lámina cuarto de onda cuyos ejes rápido y lento forman  $45^\circ$  con el eje polarizador. Una lámina cuarto de onda es una lámina de un material apropiado, y dimensionada de tal forma que, al incidir sobre ella un rayo de luz emergen de ella dos rayos (el rayo ordinario y el rayo extraordinario) paralelos al rayo incidente y superpuestos, polarizados según dos direcciones ortogonales entre sí de manera que uno (polarizado según el denominando eje lento de la lámina cuarto de onda) lleva un desfase respecto al otro (polarizado según el eje rápido) de  $\lambda/4$ , lo que equivale a un desfase angular de  $\pi/2$ .

La luz emergente atraviesa el modelo cargado, incidiendo sobre otra nueva lámina cuarto de onda, cuyos ejes son paralelos a los de la lámina cuarto de onda previa pero intercambiados de posición, para luego incidir sobre lo que se denomina analizador y que vuelve a ser otro polarizador lineal. El eje de polarización puede ser colocado paralelo u ortogonal al eje del primer polarizador.

Analizando los índices de refracción obtenidos y su relación con las tensiones se deduce que la diferencia de tensiones principales es constante y proporcional al orden de franja (o isocromática, observadas a través del analizador como colores en caso de luz blanca o en escala de grises en caso de luz monocromática) a lo largo de una franja de orden  $N$ , como podemos comprobar en la ecuación fundamental de la fotoelasticidad, o ley tenso-óptica (8):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n F}{e} \quad (8)$$



Donde:

$n$  = entero que representa el orden de franja.

$F = \lambda/C$ , valor de franja constante del material.

$e$  = espesor de la pieza.

Empleando un procesamiento de imágenes posterior a la obtención de los datos se realiza el análisis de la intensidad de tensiones y su distribución en todo el componente.

## 2.2. Correlación digital de imágenes (DIC)

Correlación Digital de Imágenes [12] [13] es un método no invasivo que mediante análisis de imágenes digitales del objeto sometido a ensayo permite obtener el campo completo de desplazamientos. Dependiendo si el desplazamiento se produce en el plano o fuera de él, la técnica de correlación digital de imágenes debe emplearse en dos o en tres dimensiones.

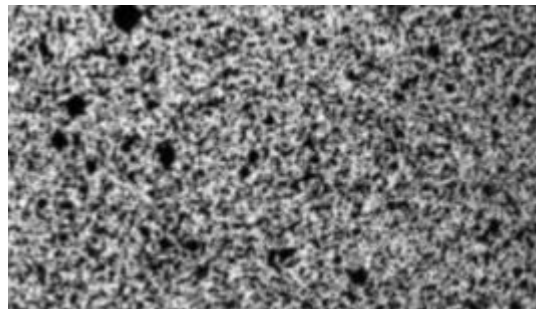


Figura 14: Imagen de *speckle* para procesamiento con DIC [13]

Para poder analizar mediante DIC las imágenes de un ensayo, estas deben tener una distribución aleatoria de intensidad en la escala de grises, para lo cual se aplica de forma aleatoria unos puntos negros en forma de pintura sobre un fondo blanco, conjunto denominado *speckle* (fig. 14), en la probeta sobre la que se realiza el





ensayo. El tamaño de dichos puntos sobre la superficie puede influir en la precisión de los resultados obtenidos, teniendo que buscar cuál es la relación óptima dependiendo del ensayo a realizar.

Una vez recogidas las imágenes durante al aplicación de la carga, con lo que obtendremos una setrie de imágenes en secuencia desde el inicio del ensayo sin carga hasta el estado deformado final, la técnica de correlación de imágenes calcula el movimiento en cada uno de los puntos de las imágenes comparando la imagen en estudio con la imagen de referencia. Para el cálculo del movimeinto, la imagen se divide de forma uniforme en distintos conjuntos, generalmente cuadrados (fig. 15), llamados facetas. Cada faceta será procesada para calcular el valor medio de la escala de grises existente en cada una de ellas y se buscará la misma faceta en la imagen deformada. Para evaluar cada una de las facetas de la imagen de referencia y la de la imagen en estudio, debe ser preestablecido un cirterio de correlación para realizar el cálculo [13].

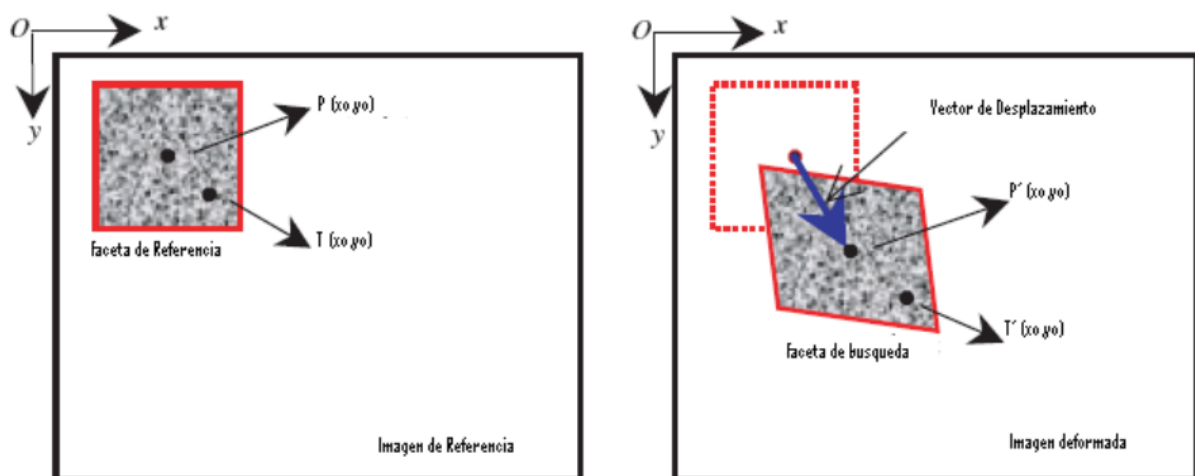


Figura 15: Imagen de referencia e imagen deformada [13]

Para el procesado de imágenes y una optimización del proceso de cálculo del vector desplazaminentos, se emplean diversos criterios de correlación, tales como la correlación cruzada, correlación cruzada normalizada o la zero correlación cruzada



normalizada. La correlación se realizará para cada faceta en la que se haya dividido el área de interés.

### 2.3.Extensometría eléctrica

La extensometría es una técnica que se basa en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones [11]. Es una técnica muy simple ya que sólo requiere el pegado de una galga extensiométrica (fig. 16) o de una roseta (fig. 17) al punto del material que queremos ensayar. La obtención del valor de deformación es muy sencillo, dado que basta con multiplicar la lectura de la galga por un factor de conversión.

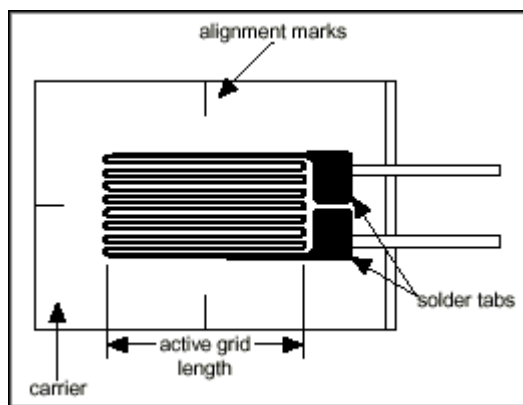


Figura 16: Galga extensiométrica [14]

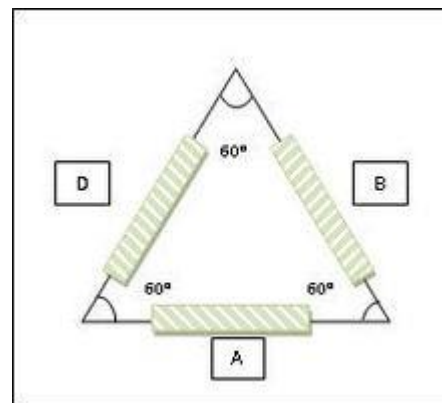


Figura 17: Roseta de deformación [15]

Una galga es un sensor basado en el efecto piezorresistivo, el cual es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos. A los extremos de la galga se sueldan los elementos de medida.

La galga se adhiere a la superficie de la pieza que se va a analizar, por tanto, la deformación del hilo será igual a la deformación del componente cuando a éste se le somete a una carga. Por otro lado, se sabe, por las propiedades de la galga, que el cambio en sus resistencia eléctrica es proporcional a la deformación.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



Al aplicar una carga, la deformación produce una lectura en un lector de galgas o en un polímetro, lectura relacionada con la variación de la resistencia eléctrica de la galga y el valor de tensión de la fuente.

El principal problema de esta técnica radica en que sólo podremos conocer los datos del punto en el que tenemos pegada la galga, desconociendo los valores de deformación y tensión del campo circundante, por lo que pierde utilidad para determinadas tareas frente a las técnicas comentadas anteriormente.



# ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DEL PROYECTO

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para  
Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



### 3. ANTECEDENTES Y EVOLUCIÓN DEL PROYECTO

Como inicio del proyecto se pensó en un circuito hidroneumático controlado mediante PC que sustituyera al actual sistema hidráulico del banco de ensayos estático, con el fin antes mencionado de realizar ensayos de fatiga dinámicos. El principal problema radicaba en la realización del propio ciclo de carga, ya que es imposible de realizar mediante electroválvulas simples, por lo que se recurrió al empleo de un regulador electroneumático ITV: una electroválvula proporcional cuya apertura y cierre podemos regular empleando una señal eléctrica.

Debido a la complejidad del sistema se opta por realizar todo el set up sólo para la dirección vertical, dejando como proyecto futuro la implementación del sistema para la dirección horizontal.

Como modo de emitir la señal eléctrica necesaria para la generación del ciclo de carga se pensó en un principio en emplear la tarjeta de sonido de un PC, emitiendo la onda requerida en cada momento mediante los comandos pertinentes de MatLab. Sin embargo, tras numerosas pruebas con distintas formas y parámetros de onda se desestimó este método debido a la imposibilidad de obtener una señal eléctrica de salida adecuada.

A continuación se pensó en el empleo de un generador de funciones capaz de emitir en un rango de 0-20 V y 0-2 MHz, además de emitir tres tipos de forma de onda: cuadrada, triangular y senoidal. Ésta última será la empleada para nuestros ensayos. Sin embargo, el empleo del generador de funciones no permitía una fluidez de manejo adecuada durante el ensayo.

Seguidamente se hizo la prueba de emitir la señal senoidal mediante la propia tarjeta Arduino. Arduino es capaz de emitir una señal senoidal empleando la modulación por ancho de pulso (PWM).



Una señal PWM (fig. 18) [16] es un tipo de señal de voltaje empleada para modificar la cantidad de energía que se envía a una carga. Nosotros la emplearemos gracias a su característica de emular señales analógicas en circuitos digitales. Su uso es simple: se crea una señal cuadrada que podrá tomar los valores 0 y 5 V. El tiempo que permanece a 0 V variará en función de la señal analógica emulada, la cual será equivalente al valor medio integrado en el periodo de la señal cuadrada. A continuación podemos ver ejemplos de cómo se generarían tres señales analógicas distintas, a 1.25, 2.5 y 3.75 V respectivamente.

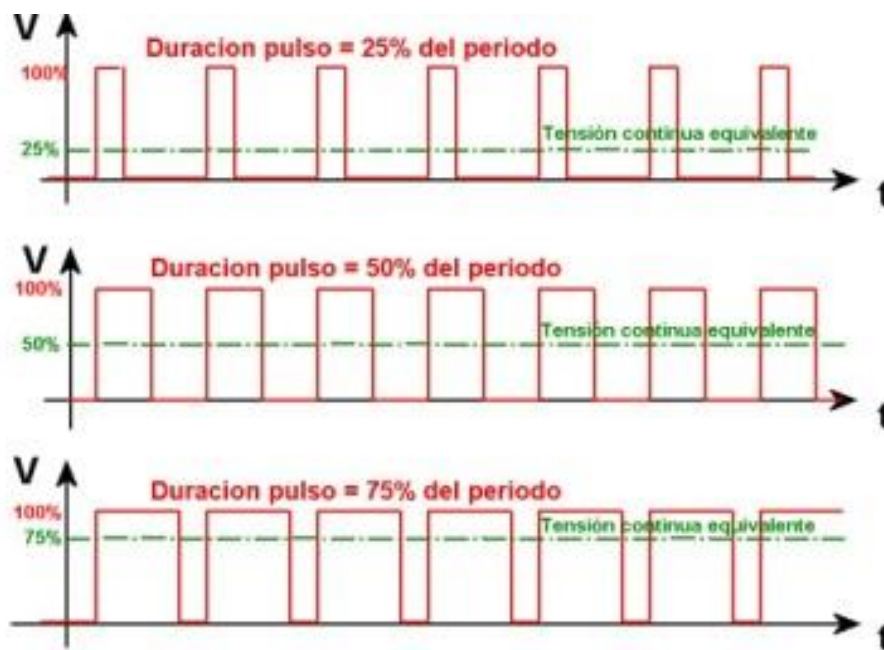


Figura 18: Señales PWM (Pulse-Width Modulation) para distintos valores [17]

Por lo tanto, para la generación de la señal senoidal simplemente debemos variar en cada momento de tiempo el valor de la señal analógica en función de los parámetros de dicha señal que queramos emular.

Sin embargo, el banco de ensayo no puede rendir mas allá de los 2 Hz debido a los diámetros de las conducciones, sus longitudes, y las características técnicas de las electroválvulas, ya que se necesitan unos tiempos mínimos de acción y retorno de los fluidos. Como posible futura mejora se podría plantear la sustitución de las



electroválvulas empleadas actualmente por otras de mayores dimensiones, así como la sustitución de las conducciones por otras más cortas. En el caso de realizarse esta última modificación sería necesaria una recalibración completa del sistema.

Una vez completado el set-up original se procedió a relizar un ensayo de prueba, aún empleando el generador de funciones como elemento emisor de la señal senoidal. El ensayó se realizó con los parámetros mostrados en la Tabla 1:

|                    |        |
|--------------------|--------|
| <b>Valor medio</b> | 4 kN   |
| <b>Amplitud *</b>  | 2.5 kN |
| <b>Frecuencia</b>  | 0.5 Hz |

Tabla 1: Parámetros del ensayo

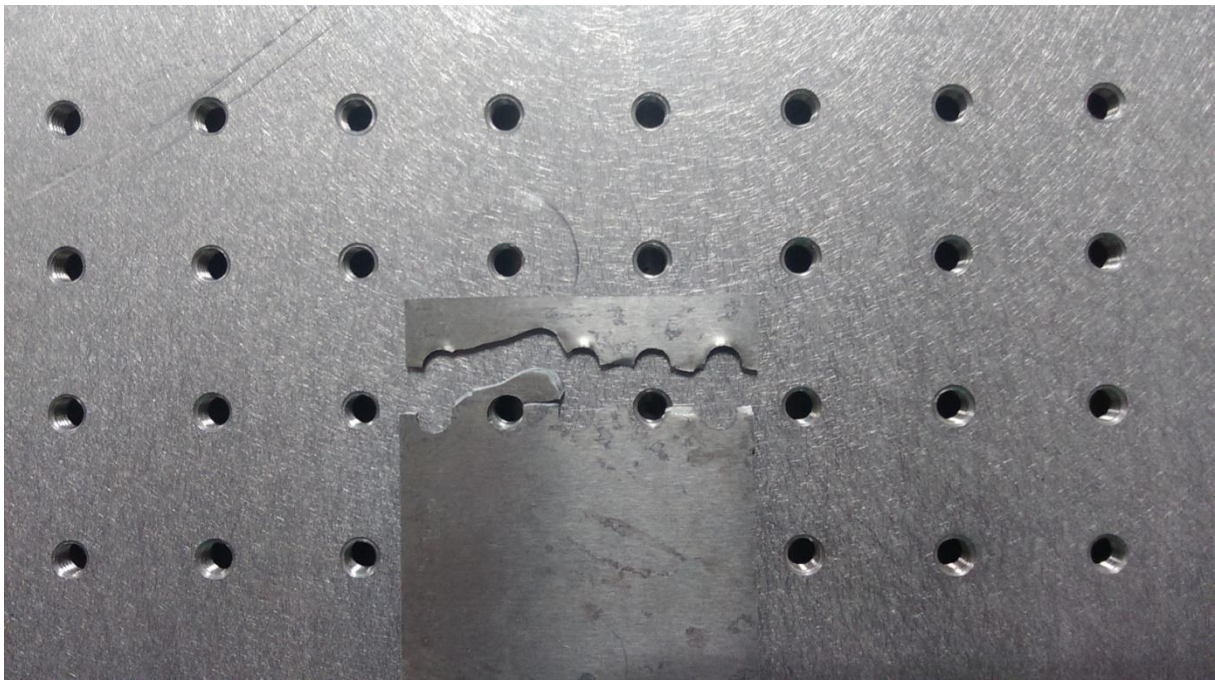


Figura 19: Probeta rectangular fracturada a través de los taladros de sujeción a mordaza

\* A lo largo de todo el presente trabajo nos referimos a la amplitud como la mitad del valor medio entre el valor máximo y el mínimo.





Finalmente comprobamos como la probeta fracturaba a los 83490 ciclos, pero no por la entalla, sino a través de los taladros de sujeción a la mordaza superior (fig. 19). Este es un problema que había sido previsto como posibilidad, por lo que a continuación se procedió al diseño de unas nuevas mordazas, esta vez haciendo un agarre por presión sobre las probetas.

El diseño se compone básicamente de dos partes: la base deslizante que se rosca sobre el cilindro, en la parte superior, y sobre la célula de carga, en la parte inferior; y las propias mordazas, que se unen mediante corredera con las bases deslizantes, permitiendo así mismo evitar su desplazamiento sobre ellas simplemente aplicando un ligero par sobre los tornillos allen de las bases.

1. Base deslizante: se diseñan unas bases para ambas mordazas que permitan el deslizamiento transversal de las mismas, mediante pequeños bloques mecanizados unidos mediante tornillos allen M10. La base superior puede bloquearse mediante dos tornillos prisioneros en uno de sus laterales, de modo que la mordaza quede perfectamente fija sobre la base y podamos centrara adecuadamente la probeta (fig. 20-22).

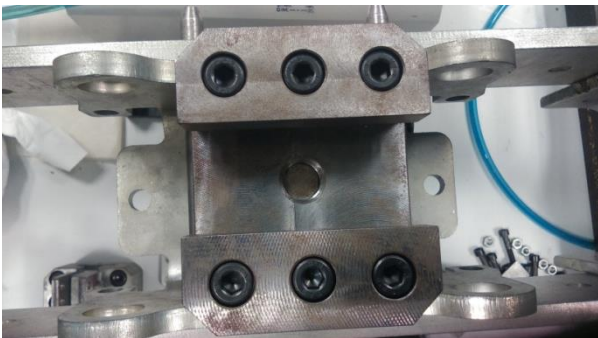


Figura 20: Vista en planta de la base deslizante inferior



Figura 21: Vista de perfil de la base deslizante inferior.





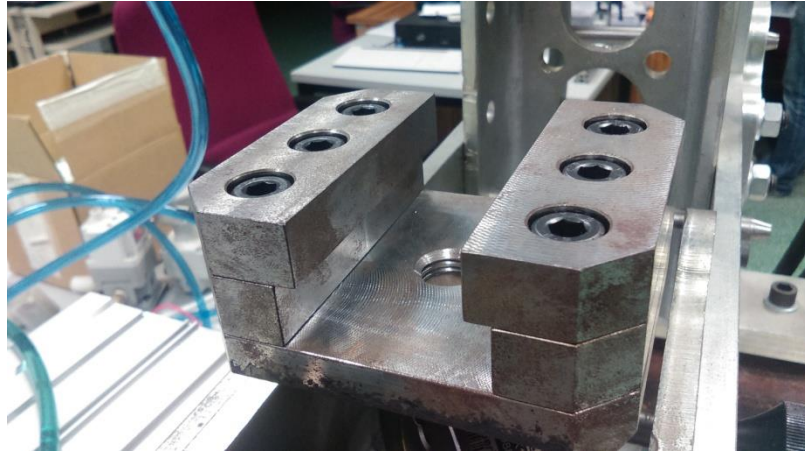


Figura 22: Perspectiva de la base deslizante inferior.

2. Mordazas de cuña: se diseñan unas mordazas que aprisionan la probeta mediante presión de dos cuñas perfectamente paralelas que aplican una carga en toda su superficie. Las mordazas funcionan mediante un principio de tornillo-tuerca: haciendo girar la tuerca externa podemos hacer que la contracuña ascienda o descienda, haciendo así que las cuñas se abran o cierren respectivamente mediante un mecanismo de cola de milano (fig. 23-26).

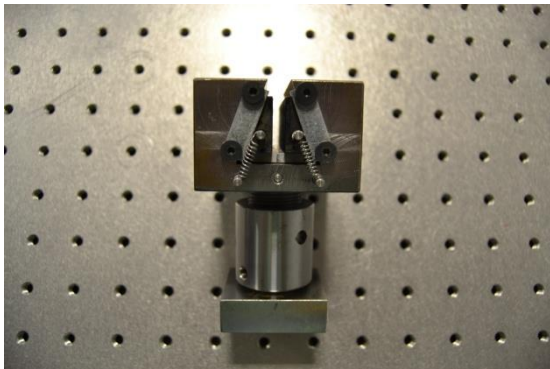


Figura 23: Vista frontal de mordaza de cuña

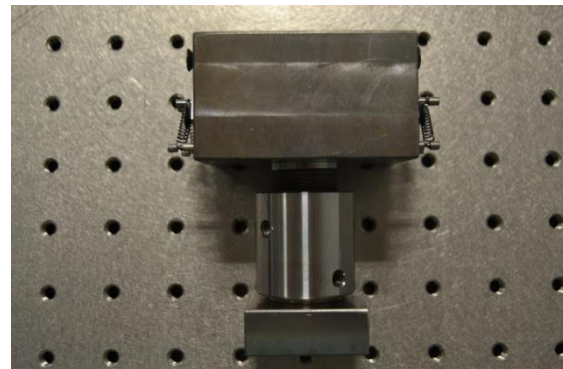


Figura 24: Vista de perfil de mordaza de cuña



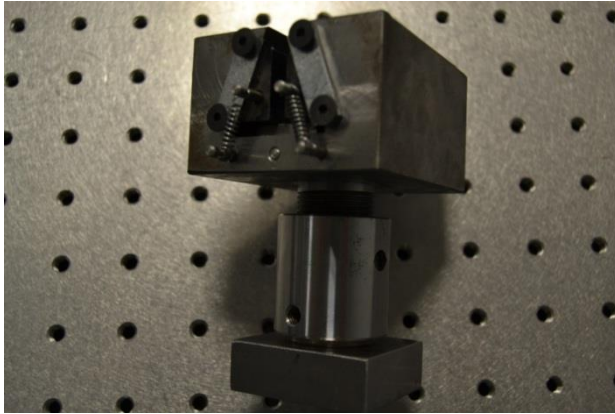


Figura 25: Perspectiva de mordaza de cuña

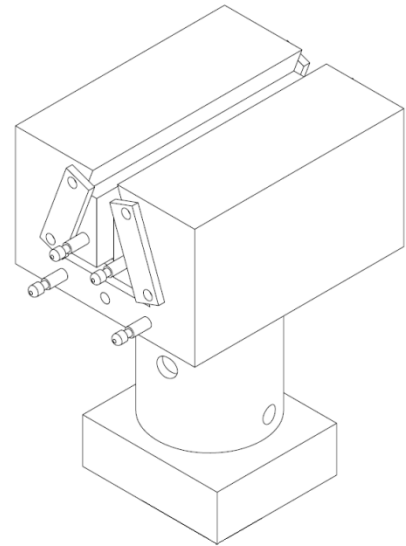


Figura 26: Boceto de mordaza de cuña completamente abierta



# MEMORIA DESCRIPTIVA

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## 4. MEMORIA DESCRIPTIVA

A continuación podemos encontrar una memoria de los componentes empleados en el proyecto, además del software desarrollado para tal fin y los ensayos realizados.

### 4.1.Descripción de componentes y software

#### 4.1.1. Fuente de alimentación

Empleamos una fuente de alimentación de 24 V regulable, ya que las electroválvulas en su totalidad funcionan a 24 V. La fuente de alimentación escogida es una fuente marca Tektronix modelo PS283. Se hace necesario también un adecuado ajuste de la generación de intensidad eléctrica para el funcionamiento del sistema.



Figura 27: Fuente de alimentación de 24 V

#### 4.1.2. Electroválvulas

##### 4.1.2.1. Electroválvula 3/2

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



Electroválvula de 3 vías y 2 posiciones (fig. 28), empleada para la movilidad hacia arriba del actuador neumáticamente en vacío. Funciona mediante accionamiento de solenoide a 24 V (fig. 29), con un rango de presión de trabajo de 0 a 0.9 MPa.

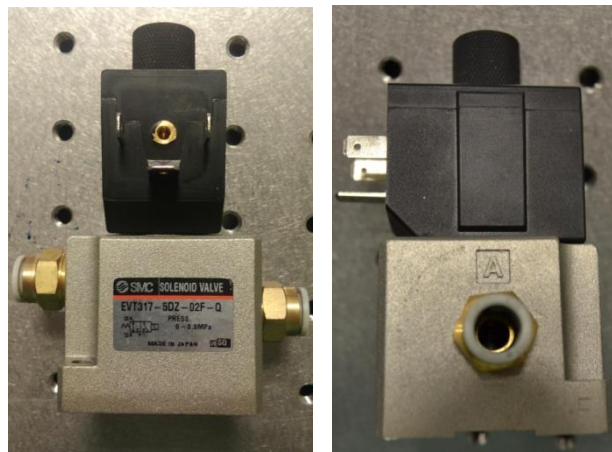


Figura 28: Electroválvula de 3 vías y 2 posiciones,

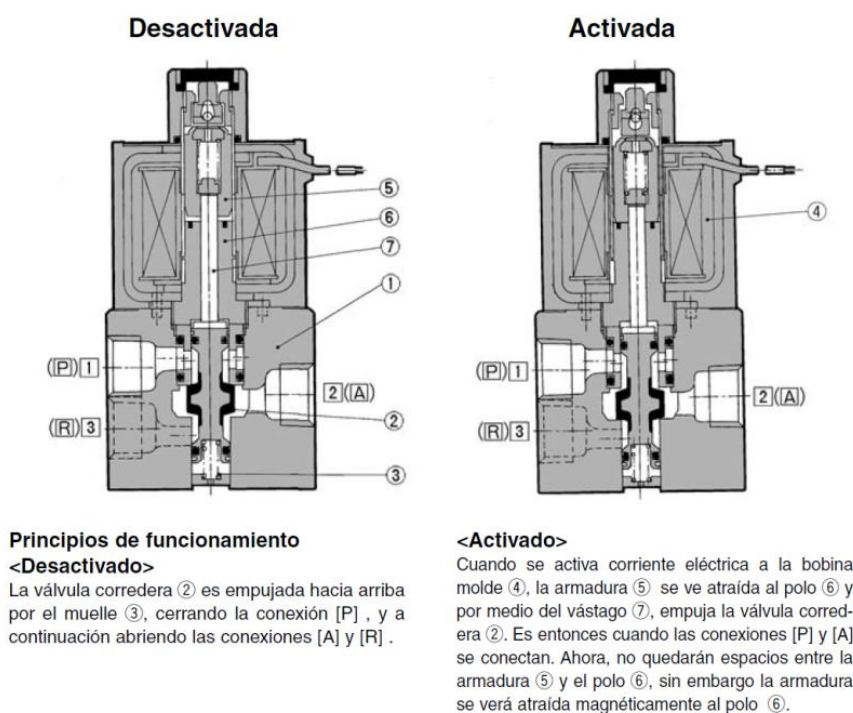


Figura 29: Esquema de funcionamiento de electroválvula 3/2



#### 4.1.2.2. Electroválvula 5/3

Electroválvula de 5 vías y 3 posiciones (posición central de reposo) (fig. 30), empleada para la movilidad del actuador hidráulicamente hacia abajo en vacío y durante el ciclo de carga. Presenta un rango de presión de trabajo de 0.2 a 0.7 MPa, por lo que por debajo de esa presión de 0.2 MPa se produce una ligera pérdida del pilotaje (fig. 31).

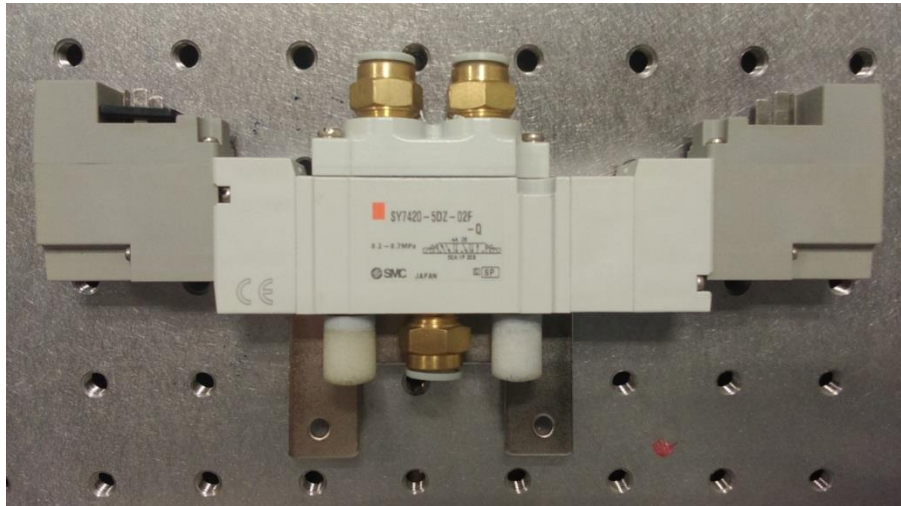


Figura 30: Electroválvula de 5 vías y 3 posiciones, con escape al centro

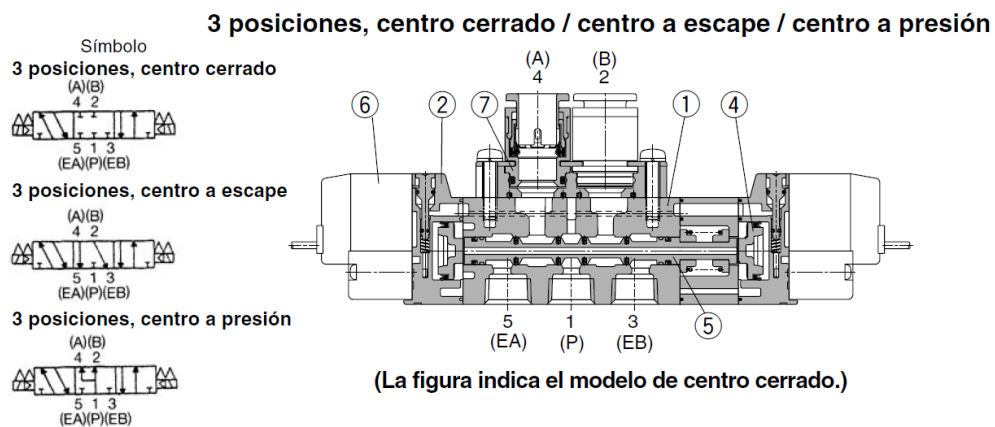


Figura 31: Esquema de electroválvula 5/3

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





#### 4.1.2.3. Transductor de presión electroneumático (ITV)

Electroválvula proporcional (fig. 33), encargada tanto del descenso del actuador para descarga, como para precarga y ciclo de carga. Esto es debido a que predeterminadamente permanece cerrada sin la aplicación de corriente eléctrica, por ello, al pasar el aire a través de ella siempre que lo requerido no sea subir el actuador en vacío deberemos aplicarle una corriente para abrirla.

La alimentación de la señal de control puede oscilar entre 0 y 5 V, siendo su presión regulable entre 0 y 9 bar (fig. 32). Para nuestros ensayos, restringidos por la tarjeta de adquisición de datos, ponemos el máximo de presión del ITV en 6 bar.

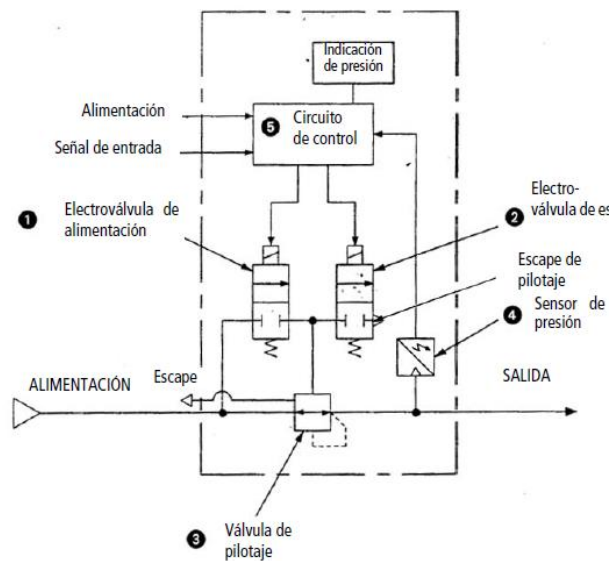


Figura 32: Esquema del transductor electroneumático



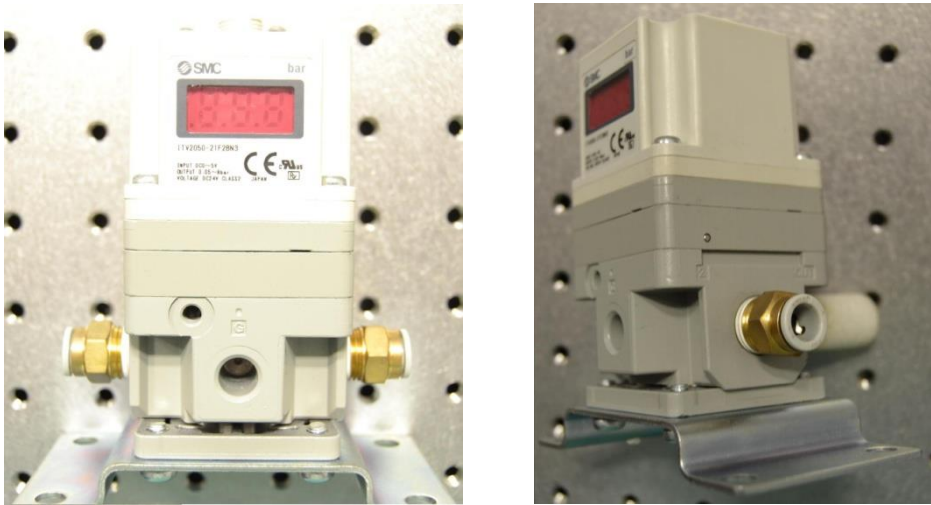


Figura 33: Transductor de presión electroneumático (ITV)

#### 4.1.3. Acondicionamiento de aire

##### 4.1.3.1. Filtro de aire

Es el primer componente del sistema que recibe el aire del compresor (fig. 34). Lo limpia y elimina humedad, la cual condensa en su interior y puede ser eliminada por una purga inferior. Incorpora regulador de presión de aire.



Figura 34: Filtro-regulador de aire





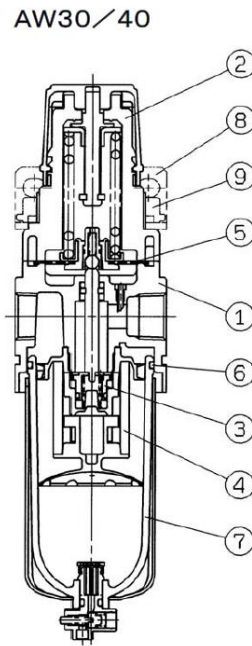


Figura 35: Vista de sección del filtro de aire



Figura 36: Válvula de paso y acople al filtro mediante grapa

#### 4.1.3.2. Válvula de paso

Válvula de paso acoplada al filtro de aire mediante grapa. Abre o cierra el paso del aire al circuito (fig. 36).

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



#### 4.1.3.3. Regulador de presión

Regulador de presión colocado inmediatamente antes de la electroválvula ITV. Permite regular el caudal de aire que circula hacia la electroválvula 5/3. Cuenta con un reloj medidor con una amplitud de medida de 1 MPa (fig. 37 y 38).

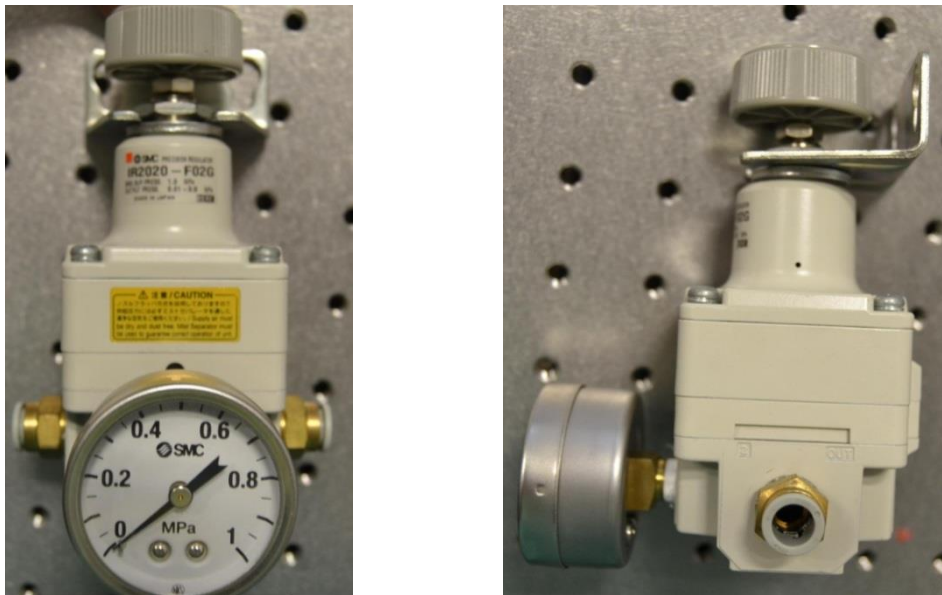


Figura 37: Regulador de presión de entrada al sistema

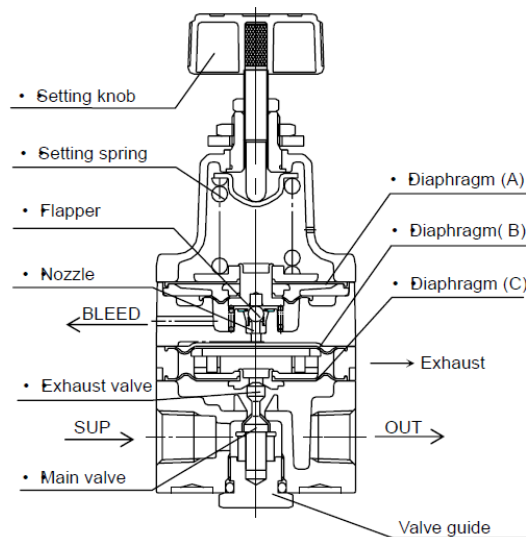


Figura 38: Mecanismo interno del regulador de presión

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



#### 4.1.4. Conversión – multiplicación hidroneumática

##### 4.1.4.1. Transformador hidroneumático



Depósito que permite convertir presión neumática en presión hidráulica a razón 1:1, con indicador del nivel de aceite (fig. 39). Permite admisión de aire por la parte superior, a la que también se le ha acoplado un regulador de presión, y escape de aceite por la parte inferior.

Figura 39: Transformador hidroneumático

##### 4.1.4.2. Multiplicador de presión hidroneumático

Sistema de dos émbolos que permite la multiplicación de presión neumática a presión hidráulica a razón 1:10 (fig. 40). Elemento principal del sistema junto con la electroválvula ITV que permite la realización del ciclo de carga. Permite 2 tomas de aire y 2 de aceite (fig. 41).



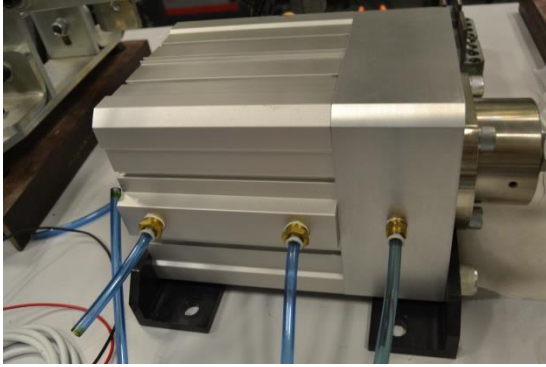


Figura 40: Multiplicador de presión hidroneumático

CQ2L160-DCG5644G-101 (pressure increase ratio: 1 to 10) / Wall mount type

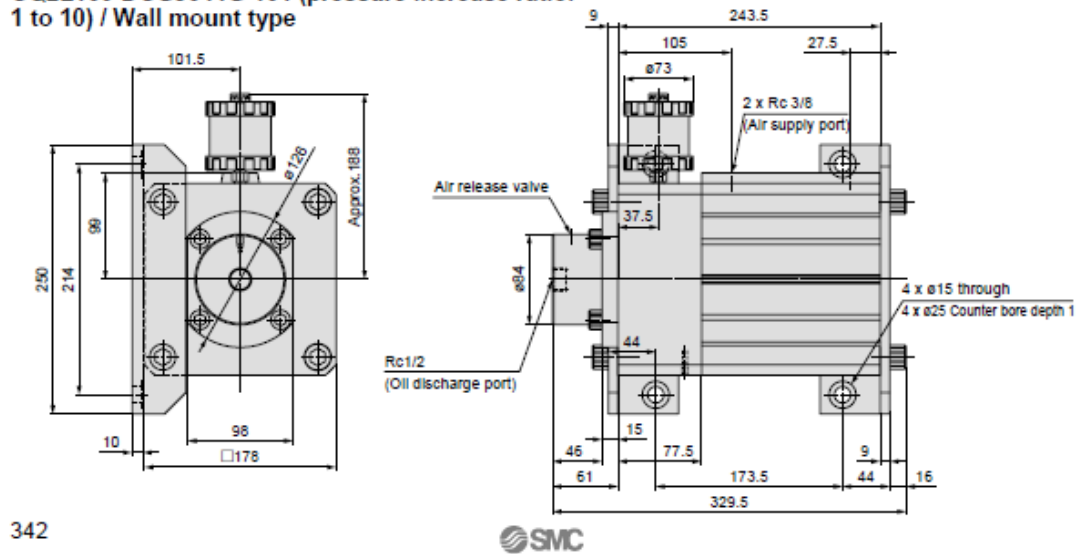


Figura 41: Esquema de dimensiones del multiplicador de presión

#### 4.1.5. Sistema de adquisición de datos

Este subsistema se encarga de recoger las señales relevantes del ensayo, principalmente la señal eléctrica emitida y la carga recogida por una célula de carga.

##### 4.1.5.1. Célula de carga

Los valores de carga se miden gracias a una célula de carga, cuyo límite de carga se encuentra en 15 kN (fig. 42). Se alimentan mediante  $\pm 5$  VCC y presentan

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



una sensibilidad de 2 mV/V, por lo que a máxima carga tendríamos 10 mV. Estos 10 mV constituyen una señal demasiado pequeña como para ser interpretada por nuestro sistema de adquisición, por lo que debe ser acondicionada.



Figura 42: Célula de carga de 1500 kg de capacidad de carga

#### 4.1.5.2. Acondicionamiento de la señal

Proyecto de Fin de Carrera “Desarrollo de un banco de ensayos hidráulico biaxial para el análisis de tensiones en probetas planas mediante técnicas experimentales”; Luis Fernando Mata Campos; 2010; página 44.

#### 4.1.5.3. Tarjeta Arduino

Para la adquisición de datos se emplea una tarjeta Arduino Mega 2560 (fig. 43). Mediante la misma obtenemos los datos emitidos por el acondicionador de la señal de la célula de carga.

En cuanto a señales emitidas por la tarjeta Arduino podemos encontrar tres tipos:

- a) Señal de control del ITV: señal mediante la cual controlamos la regulación de la electroválvula proporcional.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



- b) Señal de electroválvulas de paso: la tarjeta Arduino es empleada para el control de las electroválvulas de paso, a través del módulo de relés, el cual es alimentado por la propia tarjeta Arduino.
- c) Señal de control de la cámara: emplearemos un pin mediante el cual controlaremos el disparador de la cámara en caso de que fuese necesaria la toma de fotografías del ensayo.

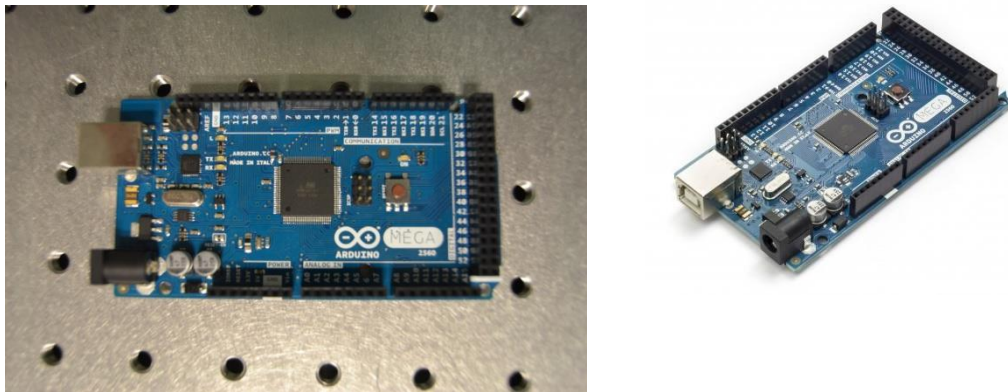


Figura 43: Tarjeta Arduino Mega 2560

#### 4.1.5.4. Módulo de relés

Módulo de 4 relés empleados en el control de las 2 electroválvulas de control, alimentado y controlado mediante la tarjeta Arduino (fig. 44).

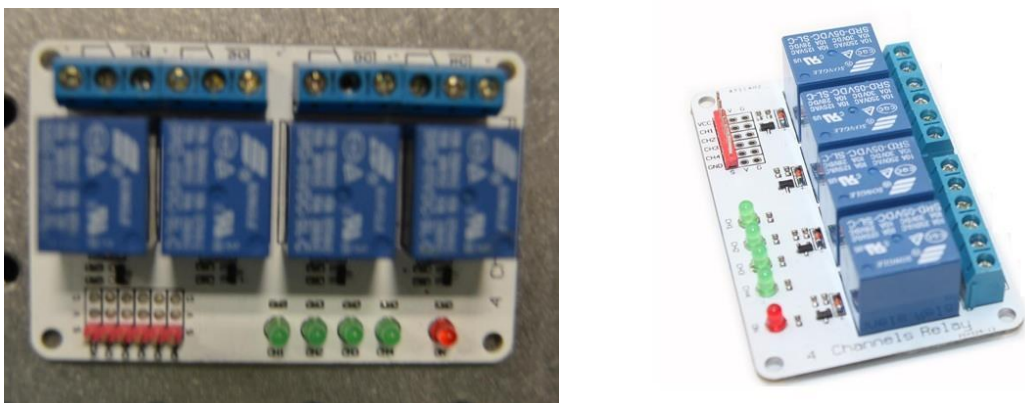


Figura 44: Modulo de 4 relés Arduino Shield

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





#### 4.1.6. Software de control

Empleamos MatLab (Matrix Laboratory) [18] para controlar la tarjeta Arduino, y a través de ella todo el sistema. Mediante una librería (fig. 45) que cargamos en Arduino al inicio del ensayo permitimos la interacción entre la tarjeta hardware y MatLab, creando un puerto COM fantasma en el PC.

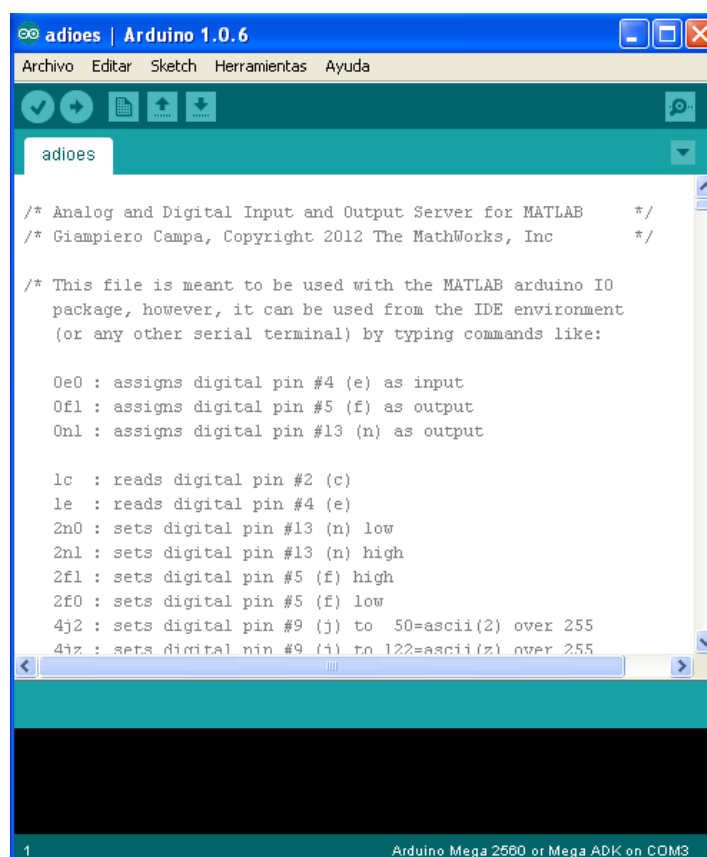


Figura 45: Librería de Arduino que permite su control a través de MatLab

Mediante una interfaz gráfica, denominada “FTB” (Fatigue Test Bank), podemos controlar todos los accionamientos de electroválvulas y visualizar las señales de entrada así como sus valores numéricos. La interfaz gráfica está desarrollada con el principal objetivo de la simplicidad. Mediante desactivaciones de elementos de la misma en determinados momentos forzamos el correcto





funcionamiento del sistema, evitando acciones que podrían ser perjudiciales para el ensayo (fig. 46).

Al depender la emisión de las señales del momento en que el programa alcance dicho punto se hace patente que el desarrollo de los ensayos será más preciso y rápido cuanto mejores prestaciones tenga el ordenador empleado para el control del mismo.

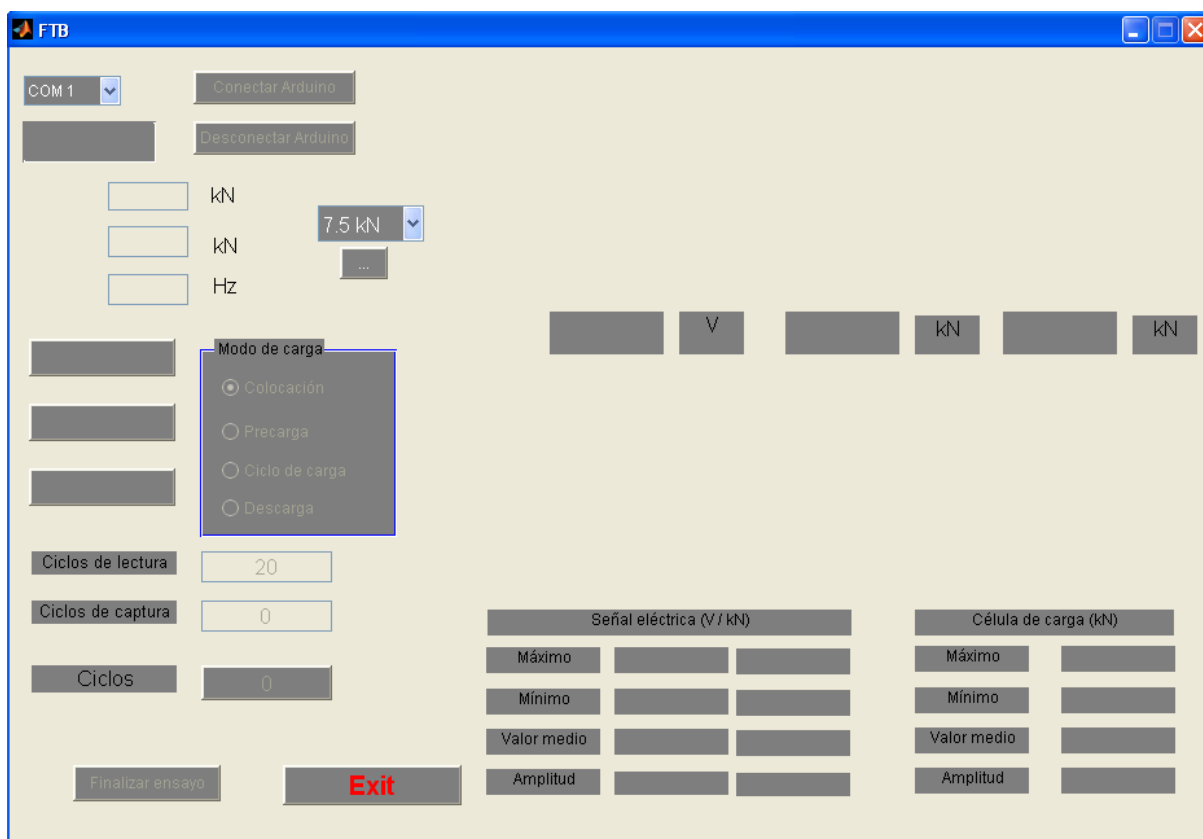


Figura 46: Interfaz gráfica empleada en el control del sistema con todos sus elementos visibles



Igualmente se ve implementado un código que permite calcular los ciclos de carga que se van aplicando y obtener una fotografía del crecimiento de grieta cada determinada cantidad de ciclos, así como reflejar datos sobre un documento de texto.

Los pasos seguidos en la realización de los ensayos serán los siguientes:

- 1) Conexión: conectamos MatLab a Arduino pulsando el botón “Conectar Arduino” (fig. 47). Una vez completada la conexión nos aparecerá un cuadro de diálogo en el centro de la pantalla solicitando el nombre de documento (fig. 48) donde se irán almacenando datos cada una determinada cantidad de ciclos estipulada por el usuario. Si no elegimos ningún nombre no se creará ningún registro de datos.

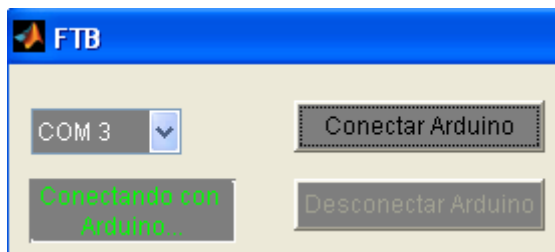


Figura 47: Proceso de conexión de MatLab con Arduino.

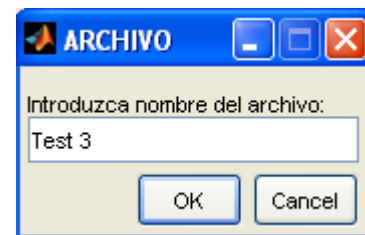


Figura 48: Cuadro de introducción de nombre de archivo

- 2) Colocación: como se puede comprobar, el sistema comienza automáticamente a leer datos de la célula de carga y de la tarjeta Arduino, mostrados en dos gráficas, una superior para el voltaje aplicado y la inferior para la lectura de la célula de carga y la carga teórica aplicada. El primer paso consiste en colocar la probeta en las mordazas. Para ello colocamos la parte inferior de la probeta sobre la mordaza y regulamos, en modo Colocación del programa (fig. 49), la posición de la mordaza superior moviendo el cilindro. La regulación en bajada se hace mediante la señal de entrada al ITV, aplicando



una pequeña señal de 0.78 V, equivalente a unos 150 N aproximadamente, mientras que la regulación en subida se realiza mediante el ajuste manual del regulador de presión acoplado a la parte superior del transformador aire-aceite. Con la mordaza ya en la posición adecuada la apretamos lo máximo posible para una correcta sujeción de la probeta.

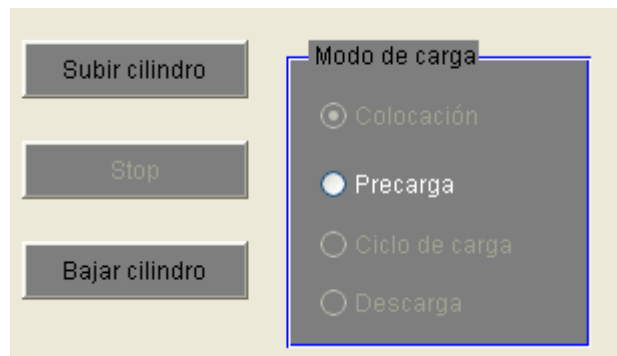


Figura 49: Interfaz en modo Colocación

- 3) Precarga: una vez bien colocada y sujeta la probeta colocamos el programa en modo Precarga. Primero debemos elegir cuidadosamente el fondo de escala que emplearemos en el ensayo (fig. 50), eligiéndolo adecuadamente conforme a los valores máximos con los que trabajaremos, variando asimismo el regulador de la centralita hidráulica.

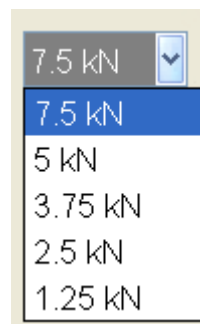


Figura 50: Distintos fondos de escala de la célula de carga



A continuación elegimos un valor de precarga y pulsamos Precargar, con lo que la electroválvula 5/3 se coloca en la posición adecuada y comenzamos a emitir una señal eléctrica constante con Arduino. Una vez emitida la señal el botón Precargar pasará a desactivarse y llamarse Precargado (fig. 51). Aumentamos el valor poco a poco mediante una señal de rampa hasta alcanzar el valor medio de la señal que requeriremos durante el ensayo variando el valor directamente.

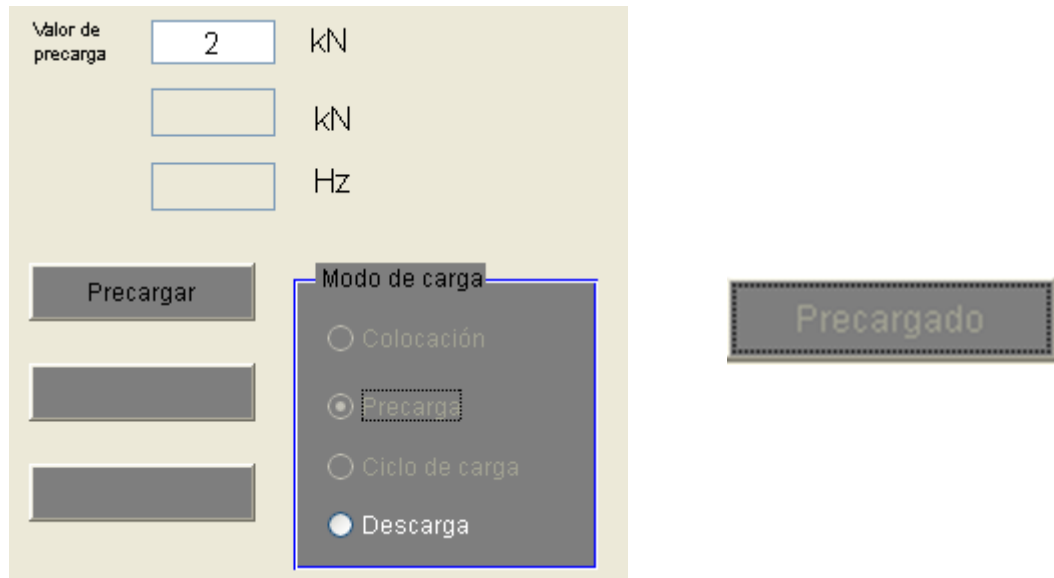


Figura 51: Selección de un valor de precarga y botón de precarga una vez aplicada esta

- 4) Ciclo de carga: con la probeta precargada colocamos el programa en modo Ciclo de carga (fig. 52), lo que activa la posibilidad de introducir una amplitud y una frecuencia. Hasta que los tres parámetros del ciclo (valor medio, amplitud y frecuencia) no estén introducidos el botón Iniciar ciclo no se activará.



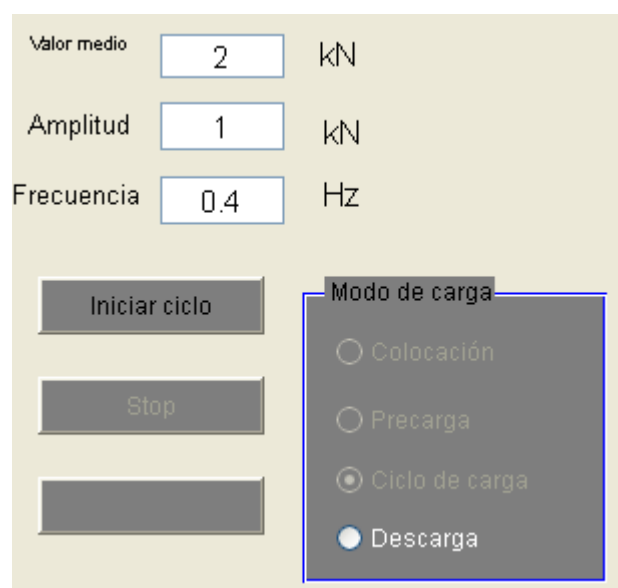


Figura 52: Interfaz en modo Ciclo de carga

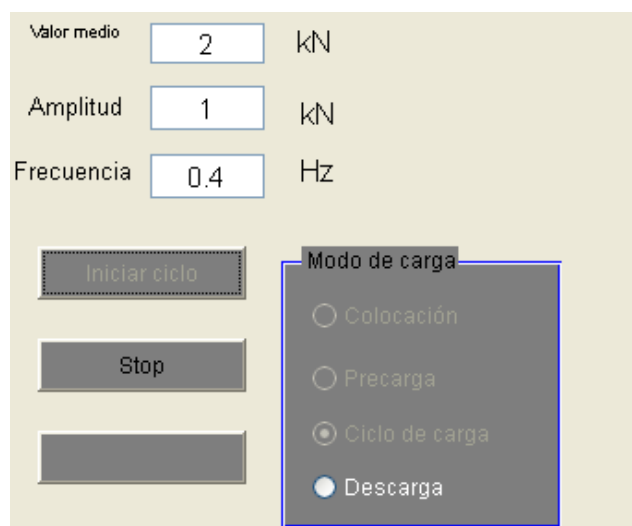


Figura 53: Sistema aplicando el ciclo de carga

Una vez preparado podremos iniciar el ciclo (fig. 53), teniendo en cuenta que deberemos cambiar el fondo de escala si fuese necesario durante el ensayo.



Podemos ver una considerable cantidad de datos en tiempo real:

- Datos de voltaje aplicado (azul), su equivalencia en carga (verde) y la carga leída instantáneamente por la célula de carga (rojo), entre las dos gráficas (fig. 54). Hay que tener en cuenta que debido al desfase existente entre la emisión de la señal y la actuación de los componentes físicos, el dato de carga teórica instantánea no coincidirá con el dato instantáneo de la célula de carga.
- Datos de valor medio, amplitud, valor máximo y valor mínimo de los mismos parámetros anteriores, bajo la gráfica de lectura de la célula de carga (fig. 55). Se calculan en base a los datos instantáneos de los últimos 10 segundos de ensayo.



Figura 54: Mediciones instantáneas del ensayo

|             | Señal eléctrica (V) | Carga teórica (kN) | Célula de carga (kN) |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| Máximo      | 1.90196             | 2.99968            | 3.13116              |
| Mínimo      | 0.0392157           | 1.00005            | 0.807372             |
| Valor medio | 0.970588            | 1.99996            | 1.96926              |
| Amplitud    | 0.931373            | 0.999917           | 1.16189              |

Figura 55: Datos totales del ensayo

Como ya se ha mencionado anteriormente, debido a la falta de capacidad de los elementos neumáticos y a la calibración realizada, no podemos obtener perfectamente las señales requeridas, como podemos observar gráficamente durante la aplicación del ciclo de carga.

Podemos observar los ciclos de carga aplicados en todo momento, pudiendo reiniciarlos simplemente pulsando sobre el botón que muestra el dato. En cualquier momento también podemos variar la cantidad de ciclos de



carga que deben transcurrir para la realización de la fotografía y de la toma de datos en documento de Word.



Figura 56: Visor de ciclos de carga aplicados

En caso de estar de acuerdo con la opción de guardar un registro de los datos tomados durante el ensayo podemos modificar los campos de Ciclos de lectura y de Ciclos de disparo (fig. 57), éste último en el caso de tener conectada una cámara al equipo para tomar imágenes en el punto de máxima carga aplicada. En caso de no disponer de cámara conectada al equipo basta con dejar dicho campo igualado a 0.

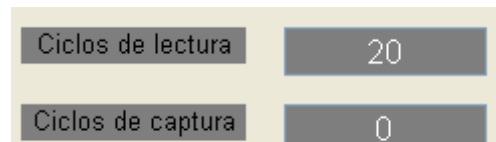


Figura 57: Visor de ciclos de lectura y de disparo.

En cualquier momento podemos detener el ciclo de carga, aplicando Arduino la señal de valor media. Sin embargo, la carga aplicada en la prueba será la última aplicada durante el ciclo.

- 5) Descarga: en cualquier momento del ensayo podemos terminarlo descargando la probeta colocando el programa en dicho modo (fig. 58). Después basta con pulsar el botón Descargar.





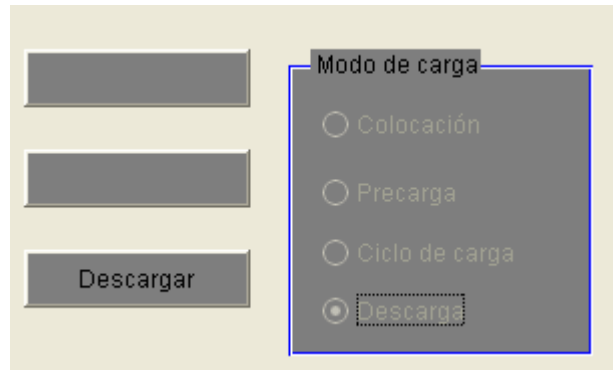


Figura 58: Interfaz en modo descarga

La descarga se produce reduciendo el nivel de carga aplicada progresivamente hasta 0, a razón de 808 N/s aproximadamente (fig. 59). Sin embargo, la simple reducción hasta 0 de la carga no descarga completamente al probeta, ya que tensiones residuales se quedan almacenadas en la probeta. Por lo tanto debemos aplicar una ligera compresión que compense estas tensiones de tracción, cambiando por unos segundos al modo de bajada en colocación (fig. 60).

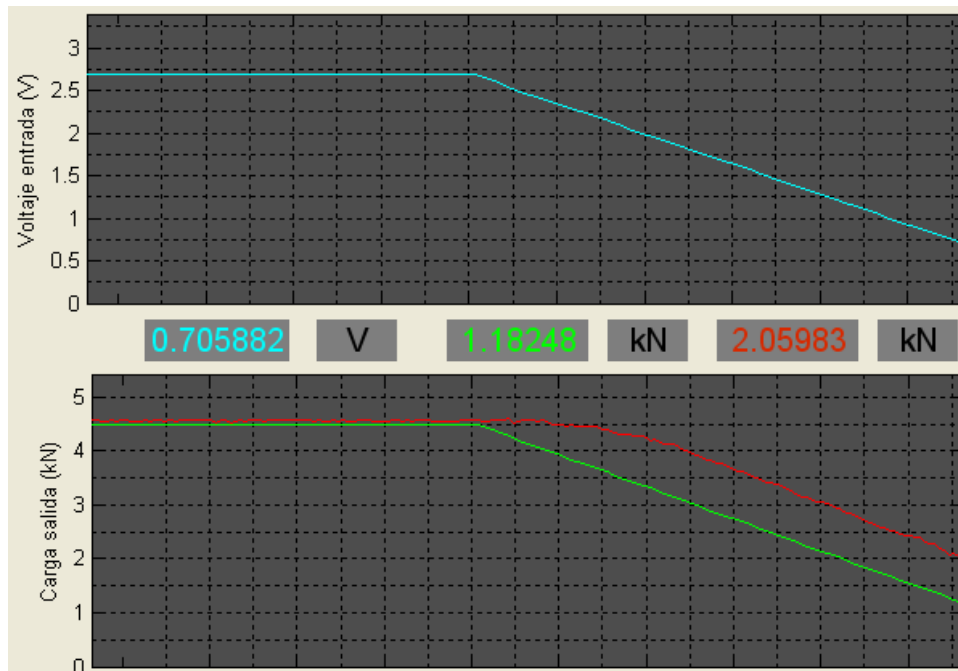


Figura 59: Inicio de la descarga, donde puede observarse la reacción a la señal de rampa descendente



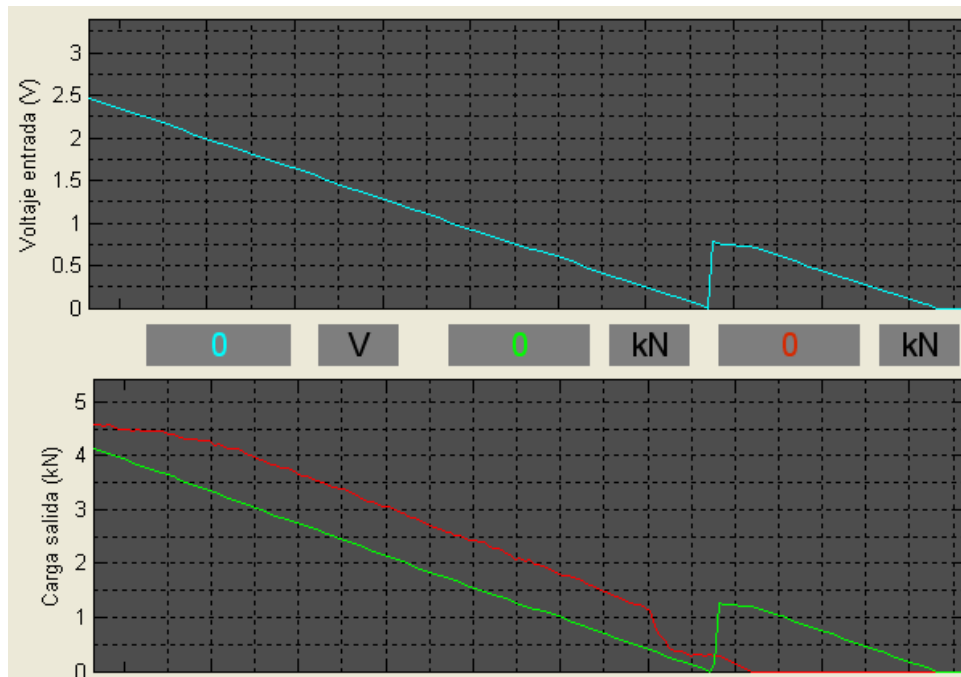


Figura 60: Parte final de la descarga, donde se muestra el cambio de modo momentaneo para reducción de la tensión residual

- 6) Finalización del ensayo: una vez finalizado el ensayo podemos automáticamente comenzar uno nuevo pulsando sobre Finalizar ensayo.

En caso de no requerir más uso del programa pulsamos sobre Desconectar Arduino y Exit posteriormente (fig. 61).

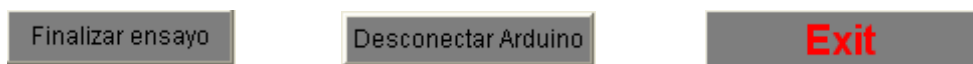


Figura 61: Botones de finalización de ensayo, desconexión MatLab-Arduino y salida de la interfaz

#### 4.1.6.1. Calibración

Se hace necesaria una calibración del banco de ensayos para una determinación lo más óptima posible de las condiciones iniciales del ensayo. El objetivo final será obtener los datos de entrada a la electroválvula ITV en unidades de voltaje para obtener las condiciones de ciclo de carga requeridas.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



El razonamiento seguido es el siguiente: buscamos una fuerza concreta, por lo que regulamos el voltaje aplicado hasta obtener una fuerza final lo más similar posible a la esperada.

$$F_{esperada} \rightarrow V_{aplicado} \rightarrow F_{final}$$

Suponiendo idealidad tenemos que  $F_{esperada} = F_{final}$ . Por lo tanto, ya que buscamos una expresión de la forma  $V(F_{final})$ , podremos afirmar que las expresiones encontrados aproximan fiablemente a  $V(F_{esperada})$ .

Ya que el banco de ensayo puede seguir usándose como banco de carga estática calibraremos el modo de precarga independientemente del modo de ciclo de carga (carga dinámica). Como se puede comprobar más adelante la señal de valor medio emitida en el ciclo depende de la carga media que queramos y la frecuencia del ciclo, por lo que cabría pensar que basta con igualar a 0 la frecuencia del ciclo para tener la función que determina la carga estática. Sin embargo, debido a posibles pérdidas de carga intermedias o pérdidas por inductancias, se prefiere hacer una calibración independiente experimental, más fiable que aplicando la suposición anterior.

Para ello, en primera instancia, se toman una serie de medidas siguiendo las siguientes consideraciones:

- Se tomarán medidas tanto a valor medio de entrada constante, como de amplitud constante.
- Por problemas de caudal emplearemos tres frecuencias distintas: 0.2, 0.5 y 1 Hz.
- En función de la magnitud constante la magnitud restante variará entre unos determinados parámetros:



- Amplitud constante: el valor medio mínimo aplicado será igual a la amplitud aplicada para no obtener valores negativos. A partir de ahí, aplicamos valores iguales al 120, 140, 160, 180 y 200 % del valor de la amplitud. Los valores de amplitud serán 1, 1.5 y 2 V.
- Valor medio contante: el valor máximo de la amplitud aplicada será igual al del valor medio para evitar valores negativos. Desde el inicio hasta ese máximo aplicaremos valores de amplitud iguales al 20, 40, 60 y 80 % del valor medio. Los valores de valor medio aplicados serán 1.5, 2, 2.5 y 3 V.
- Todas las mediciones se realizarán un total de cinco veces.

Una vez tomadas todas las medidas, procedemos a un análisis de las mismas:

- Ordenamos los datos según sean valor medio o amplitud constante y frecuencia.
- Obtenemos los valores medios de las cinco.
- Graficamos cada conjunto de amplitudes y valores constantes a una misma frecuencia, por ejemplo, los datos de valor medio constante correspondientes a 0.2 Hz. Obtenemos de esta forma un total de 6 gráficas, cuyo eje de abscisas corresponde a los valores de entrada y el de ordenadas a la salida.
- Ajustamos linealmente cada una de las series de datos. Al hacerlo comprobamos que se superponen adecuadamente, por lo que procedemos a graficar las series de datos de igual frecuencia en una sola serie, es decir, asumimos que la magnitud constante de salida es independiente de la magnitud de entrada variable.



- Ajustamos linealmente esta nueva serie de datos, obteniendo las desviaciones típicas y representándolas.

Ya obtenidos los seis ajustes lineales procedemos a calcular la inversa de dichos ajustes para poder obtener los datos de entrada en función de la salida requerida.

A continuación, para unos valores mínimos y máximos de carga tomados en la toma de medidas, obtenemos los valores mínimos y máximos para esos valores correspondientes a los nuevos ajustes lineales, conociendo así los valores extremos en los que podemos hacer funcionar el banco de ensayos.

Conocidos estos datos pasamos a calcular dos ecuaciones de superficie mediante la técnica de coeficientes indeterminados empleando el software Mathematica 8. Conseguimos, de esta forma, dos ecuaciones de superficie, una de valor medio de entrada en función del valor medio de salida y la frecuencia, y otra equivalente para la amplitud.

Mediante estas ecuaciones podremos conocer los valores de entrada de voltaje que habrá que introducir para obtener la carga de salida requerida para el ensayo.

Los datos obtenidos y los cálculos realizados se muestran en el Anexo III.

#### **4.2.Descripción de Set-ups, conexiones y funcionamiento**

A continuación podemos observar en detalle el setup de conexiones oleoneumáticas del equipo, así como el setup eléctrico y una serie de fotografías de detalle.



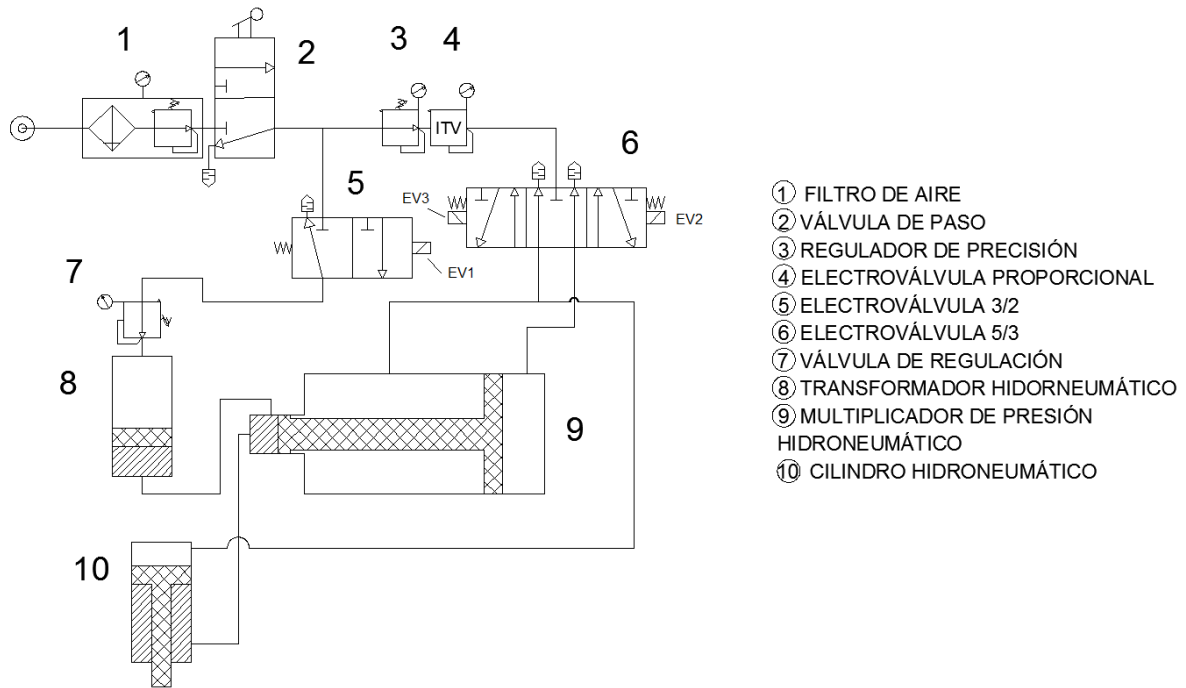


Figura 62: Esquema de conexionado oleoneumático

Para evitar en la máxima medida las pérdidas de carga en las conducciones el setup se ha diseñado de la forma más eficiente posible, por lo que la figura anterior no deja de ser una representación esquemática con el objetivo de proporcionar una rápida y eficaz interpretación. La disposición final puede observarse en las figuras 63 y 64. Todos los componentes del setup, a excepción de los más pesados (transformador y multiplicador de presión hidroneumático), han sido atornillados sobre una plancha de metacrilato de 270 x 600 mm, con cinco patas dispuestas y dos asas para un funcional manejo.

En cuanto a las conexiones eléctricas éstas se reducen al conexionado de la fuente de alimentación con el módulo de relés, las electroválvulas y el transductor de presión (fig. 65). Podemos observar también un detalle de las conexiones a pines de Arduino (fig. 66).



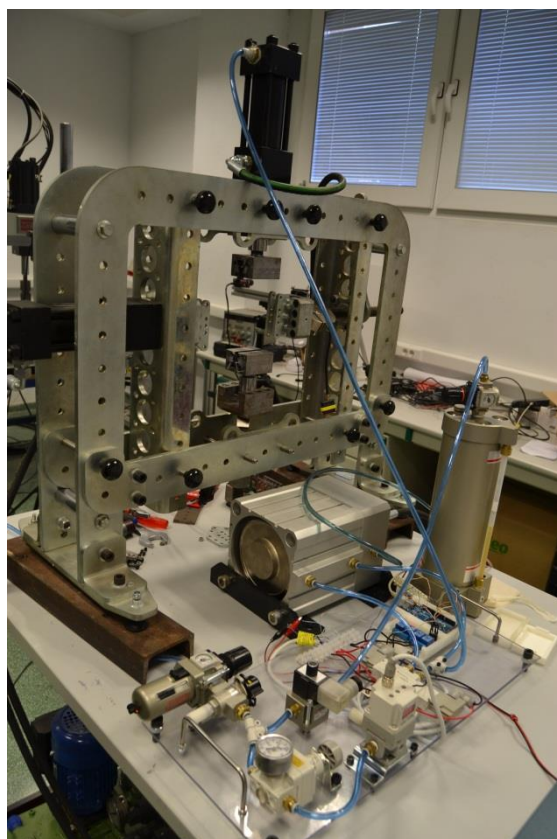


Figura 63: Vista del setup completo

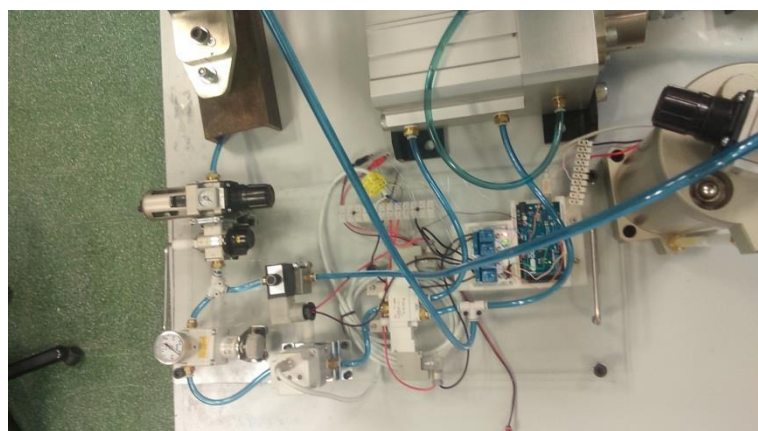


Figura 64: Vista en detalle de la mesa con parte del  
setup atornillado

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



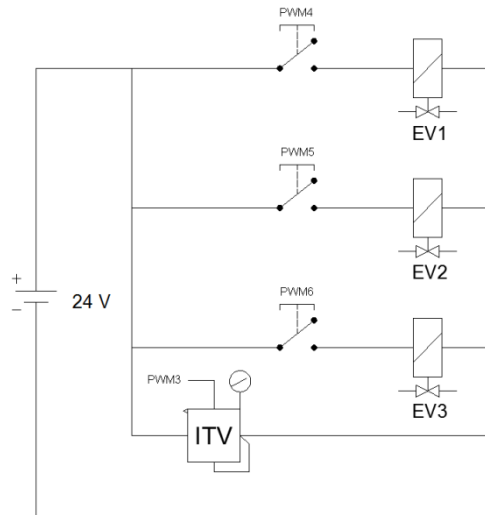


Figura 65: Esquema de conexionado eléctrico

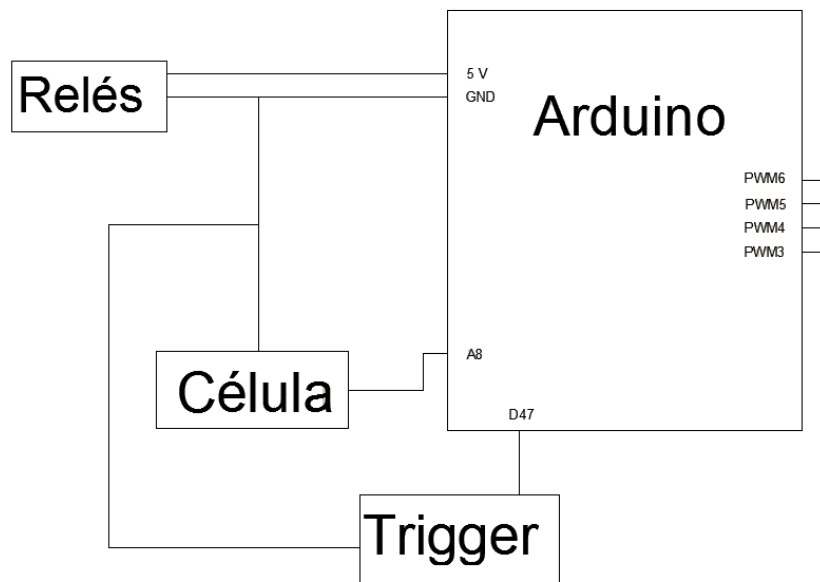


Figura 66: Esquema de conexionado con Arduino

Como ya comentamos brevemente en el apartado 4.1.5.3. , las conexiones que podemos encontrar en la tarjeta de Arduino son las siguientes:

- La tarjeta de relés se alimenta mediante el pin de salida de 5V.
- La lectura de la célula de carga se realiza a través del pin analógica A8.
- La emisión de señal para realización de la fotografía se emite desde el pin digital D47.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





- La señal emitida hacia la electroválvula proporcional se emite desde el pin PWM3. Es imprescindible emitir esta señal desde un pin PWM por los motivos sugeridos en el capítulo 3.
- Las señales de apertura y cierre de las electroválvulas de control se realizan desde los pines PWM4, PWM5 y PWM6. Si bien podrían haberse empleado pines digitales se prefirió emplear pines PWM para una disposición de cables menos molesta.

Cabe destacar que en cualquier momento los pines pueden ser sustituidos por cualquier otro de su mismo tipo variando adecuadamente el software de control.

Describiremos a continuación el funcionamiento del sistema en cada punto del ensayo, en el mismo orden que pudimos observar en el apartado 4.1.6:

- 1) Colocación: empleando este modo se nos presentan dos opciones distintas, o bien subir el cilindro o bien bajarlo. En el primer caso activamos EV1, lo que empuja el aceite desde el transformador hidroneumático hasta el cilindro hidroneumático en baja presión, llevando el cilindro hacia arriba.

En el caso de necesitar bajar el cilindro activaremos EV3, lo que permite el paso de aire hacia la parte superior del cilindro y haciendo retornar el aceite hacia los elementos 8 y 9.

- 2) Precarga: para precargar la probeta activamos EV2, lo que deriva el flujo de aire hacia la parte superior del elemento 9, desplazando su émbolo y multiplicando su presión por 10 al producirse la reducción de sección. La señal emitida a la electroválvula proporcional en este punto es una señal rampa que aumenta progresivamente hasta alcanzar el valor de la precarga solicitada para evitar sobrecargas en la probeta, lo que podría provocar zonas de ligera plastificación que ralentizarían el crecimiento de la grieta. Parte del aceite retorna hacia 8, pero llegado el momento el émbolo del multiplicador taponará la conducción hacia el



transformador, por lo que todo el aceite se desplazará hacia el cilindro hidroneumático aplicando la precarga sobre la pieza a ensayar.

- 3) Ciclo de carga: manteniendo activa EV2 comenzamos a mandar una señal senoidal a la electroválvula proporcional, por lo que el funcionamiento del sistema para valores ascendentes es idéntico al del apartado 2). Sin embargo, para valores descendentes la propia rigidez de la probeta aprovechará la reducción de carga para tratar de recuperar su posición de reposo, llevando el cilindro hacia abajo y haciendo retornar aceite hacia el multiplicador hidroneumático, siempre sin destaponar la conducción hacia el transformador.
- 4) Descarga: para la descarga de la probeta, la cual puede realizarse en cualquier momento del ensayo en que ya haya sido precargada, seguimos dejando activada EV2, pero disminuyendo progresivamente la señal eléctrica de entrada hasta alcanzar el 0, para que la propia rigidez de la probeta pueda actuar y libere la carga de la probeta sin descensos bruscos.

Como ya se explicó en el punto 5) del apartado 4.1.6. debemos hacer un cambio momentáneo de modo, por lo que desactivamos EV2 para activar EV3 y aplicar una ligera carga en sentido contrario, descendiendo la señal de voltaje a la misma velocidad que al principio.

Por último podemos observar algunas imágenes de detalle de las conexiones del setup:



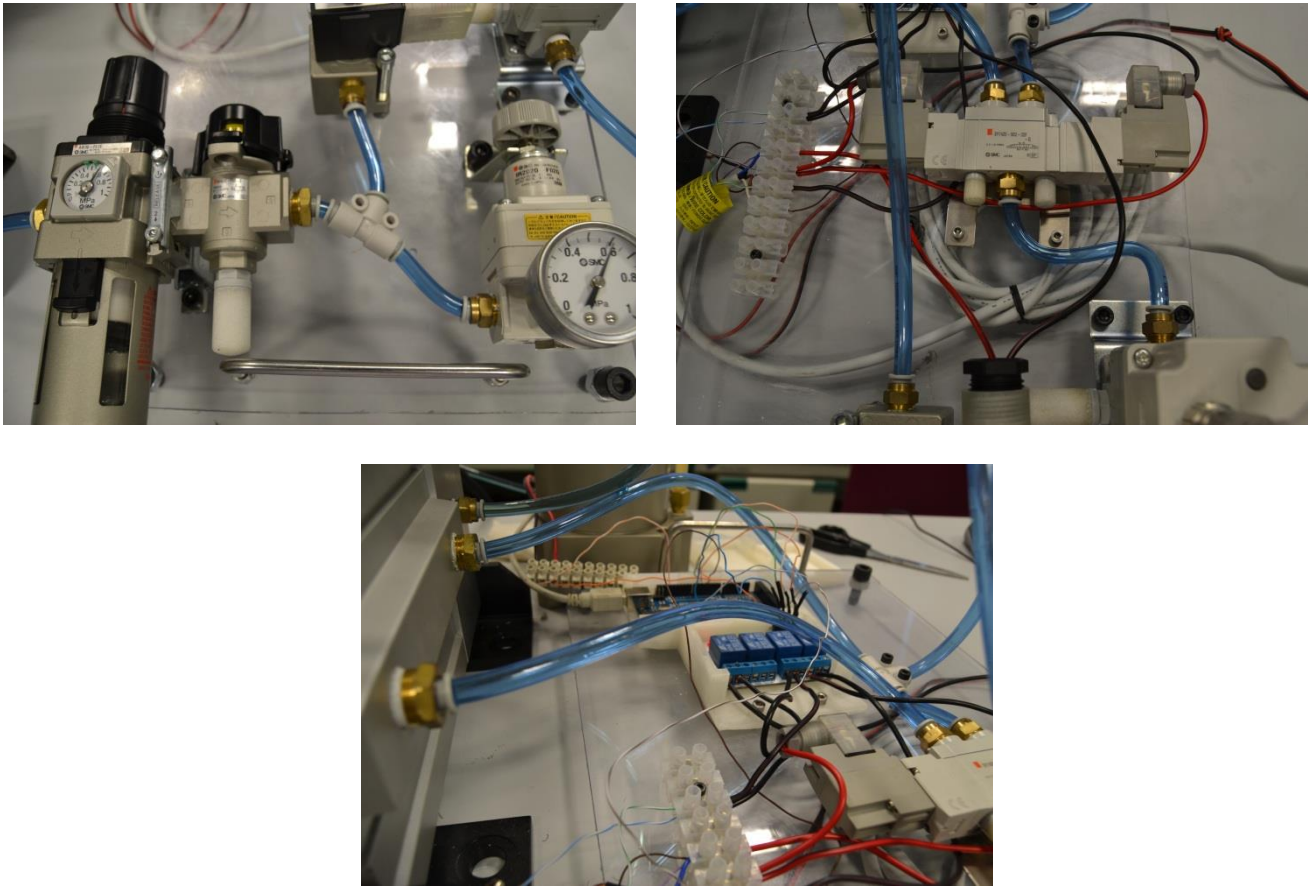


Figura 67: Imágenes de detalle de algunas de las conexiones del setup



### 4.3. Ensayos

Para demostrar la funcionalidad del puente de carga modificado se ha procedido a realizar una serie de ensayos dinámicos, analizados mediante técnica de correlación digital de imágenes.

#### 4.3.1. Metodología y equipos

Para la realización de los ensayos se han empleado los siguientes elementos y equipos externos:

- Probeta: las probetas empleadas han sido probetas de aluminio 2024-T3, cortadas por ambos extremos justo por debajo de los taladros para tener una mayor superficie de agarre en las mordazas (fig. 68), de 60 mm de anchura y 2 mm de espesor. Una cara se mantiene lisa y la otra se pinta con speckle.
- Papel de lija: debido a la calidad del moleteado de las cuñas de la mordaza se ha optado por introducir pequeños trozos de lija doble de grano grueso entre la cuña y la parte de la probeta lisa, con el objetivo de conseguir un agarre más profundo de la probeta (fig. 68).



Figura 68: Estado de la probeta tras el ensayo y papel de lija empleado



- Cámaras de alta definición: se han empleado dos cámaras de alta definición Stingray F080C, equipadas con zooms ópticos de 75 mm para un adecuado enfoque de las entallas durante el análisis (fig. 69). Una de las cámaras se coloca enfocada en la parte lisa de la probeta (fig. 70), empleando para ello un brazo extensor del trípode, y la otra se coloca enfocada en la parte pintada con speckle (fig. 71).



Figura 69: Cámara Stingray F080C de alta definición y zoom de 75 mm empleado para los ensayos



Figura 70: Brazo extensor del trípode (cámara de parte lisa)



Figura 71: Trípode (cámara de speckle)



- Multiplicador de trigger: dispositivo empleado para bifurcar las señales eléctricas de control, de forma que usando una sola señal de control podemos disparar ambas cámaras a la vez, sincronizando de esta forma la captura de imágenes durante el ensayo.

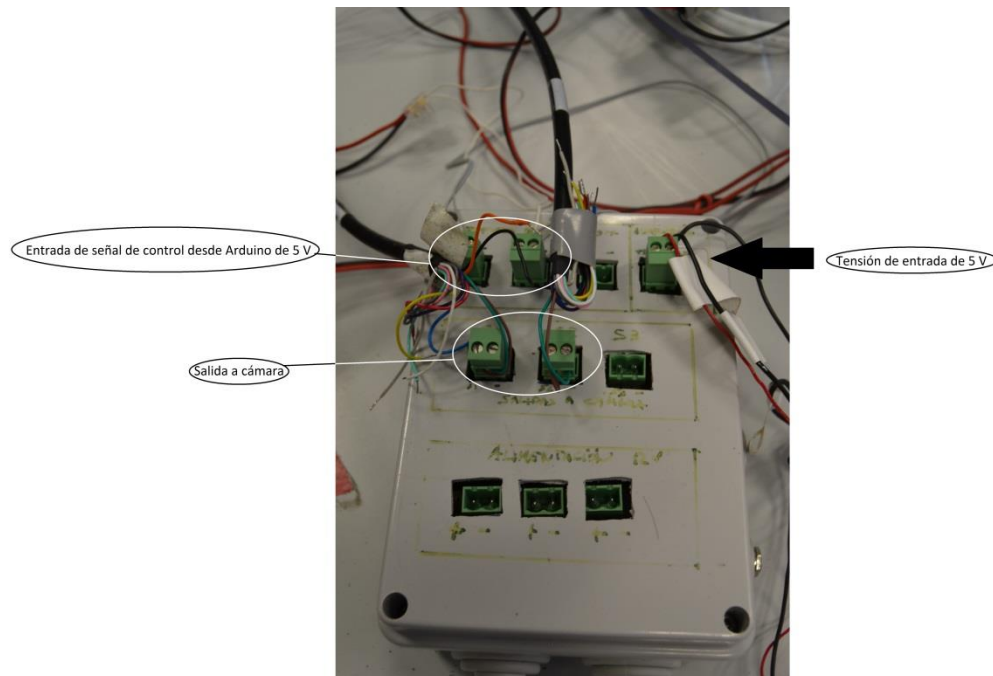


Figura 72: Dispositivo de bifurcación de la señal de control

La metodología a seguir ha sido la descrita a continuación. En primer lugar se coloca la probeta a ensayar en la mordaza inferior y se hace bajar la mordaza superior para conseguir un correcto alineamiento de la probeta (fig. 73).

A continuación se aprietan las mordazas lo máximo posible, con el objetivo de evitar cualquier tipo de afloje involuntario o escurrimiento. Para la manipulación de las mordazas se emplea una llave circular (fig. 74).

Antes de comenzar el ensayo, a carga nula, se realiza una fotografía con cada cámara, que será nuestra referencia para el análisis mediante DIC.





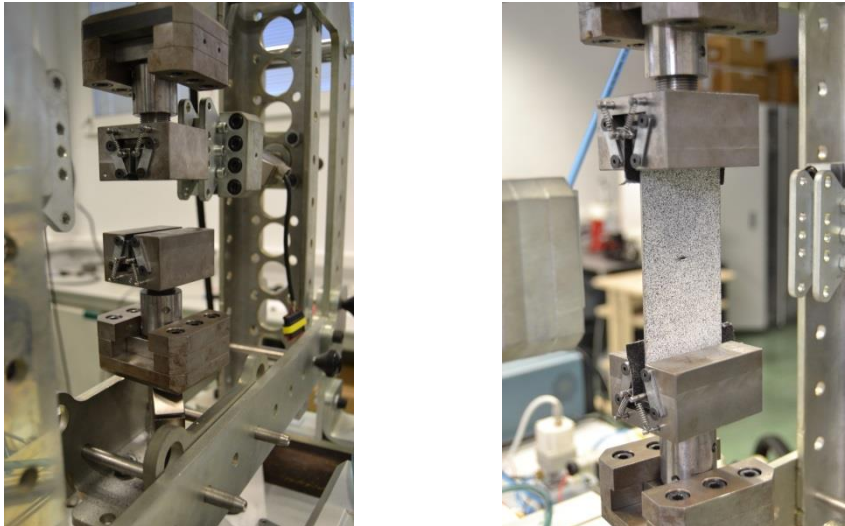


Figura 73: Puente de carga antes y después de colocar la probeta



Figura 74: Llave empleada para la manipulación (apriete y desapriete) de las mordazas

Una vez comenzado el ensayo se precarga la probeta y se inicia un ciclo de carga a un valor medio y una amplitud determinada, empleando una frecuencia de 1 Hz. La toma de fotografías se realiza a una frecuencia ligeramente más alta, de aproximadamente 1.1 Hz. De esta forma obtenemos una secuencia de imágenes que cubrirán todo el ciclo de carga una vez completados una cantidad relativamente baja de ellos, aproximadamente 25. El software de control ha sido ligeramente modificado para mostrar por pantalla la carga registrada por la célula en cada toma de imágenes.

Una vez completados los 25 ciclos, aproximadamente, tendremos entre 22 y 23 imágenes de cada lado de la probeta. Las imágenes correspondientes a la cara

*Trabajo Fin de Grado: Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



de speckle se analizan mediante DIC con el software VIC-2D, obteniendo como resultado una serie de matrices de datos para cada imagen, incluyendo deformación y desplazamiento en cada dirección y tangencialmente.

Seleccionamos 9 de estas imágenes, atendiendo al criterio de cubrir lo más equidistantemente posible todo el ciclo de carga, es decir, se divide el rango entre el máximo y el mínimo valor en 9 porciones y seleccionamos una imagen que se acerque lo máximo posible al valor medio de cada porción.

Se ha desarrollado una breve serie de scripts de MatLab mediante los cuales podemos calcular tanto teórica, mediante las ecuaciones de Westergaard (ecuaciones (4)), como experimentalmente, mediante las ecuaciones de Lamé (ecuaciones (9)), los campos de distribuciones de tensiones en ambas direcciones y tangenciales.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu)(1 - 2 \cdot \mu)} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + 2 \cdot \frac{E}{2(1 + \mu)} \cdot \varepsilon_x \\ \sigma_y &= \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu)(1 - 2 \cdot \mu)} \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + 2 \cdot \frac{E}{2(1 + \mu)} \cdot \varepsilon_y \\ \tau_{xy} &= 2 \cdot \frac{E}{2(1 + \mu)} \cdot \varepsilon_{xy}\end{aligned}\tag{9}$$

Donde:

$\mu$  = Módulo de Poisson del material (para aluminio  $\mu = 0.33$ )

$E$  = Módulo de Young del material (para aluminio  $E = 73000$  MPa)

$\varepsilon_x$  = deformación en la dirección horizontal

$\varepsilon_y$  = deformación en la dirección vertical

$\varepsilon_{xy}$  = deformación tangencial en el plano





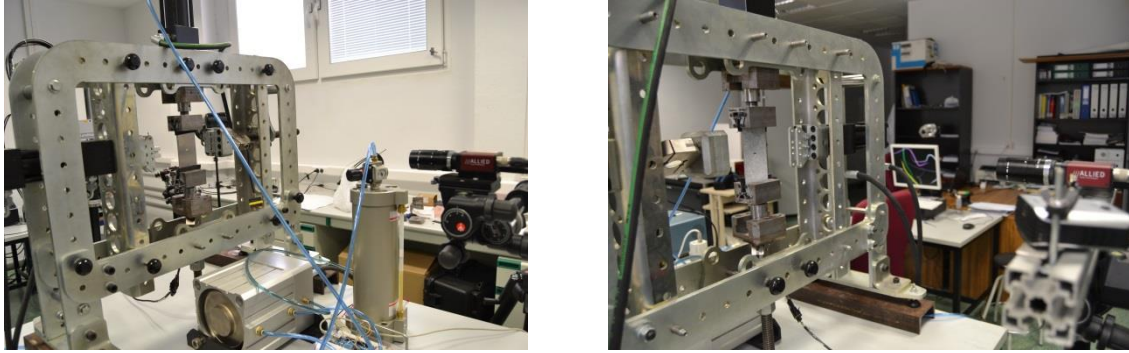


Figura 75: Vista del montaje desde ambas direcciones: a la izquierda vista de la parte lisa de la probeta; a la derecha vista de la parte pintada de speckle

Para el cálculo del factor geométrico empleado en el factor de intensificación de tensiones de la distribución teórica se ha empleado la formulación de ASTM E647 [19] (ecuación 10).

$$Y = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot a}{W}\right)} \quad (10)$$

Donde:

W = ancho de la probeta

Por último finalizamos presentando los resultados y conclusiones obtenidas.

#### 4.3.2. Resultados

Se han ensayado dos probetas diferentes, cada una con una longitud de grieta distinta y ciclos de carga diferentes, que pueden observarse en la tabla 2. El criterio para determinar el lado de la entalla es la observación de la probeta desde la cara pintada con speckle.



| Probeta | Grieta izquierda (mm) | Grieta derecha (mm) | Valor medio (kN) | Amplitud (kN) | Frecuencia (Hz) |
|---------|-----------------------|---------------------|------------------|---------------|-----------------|
| 1       | 4.252                 | 3.387               | 2.43             | 0.96          | 1               |
| 2       | 8.080                 | 8.296               | 2.19             | 0.83          | 1               |

Tabla 2: longitudes de grieta en ambas probetas

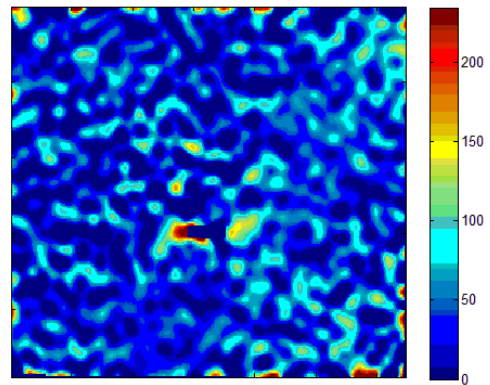
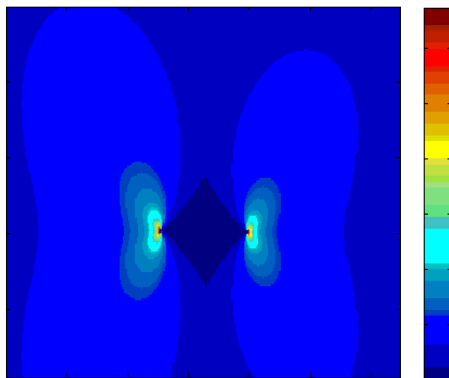
Mostraremos a continuación, para cada probeta, los resultados teóricos y experimentales comparados, mostrando el valor de tensión máxima en el eje vertical en cada uno de ellos tabulados a continuación para poder discutirlos posteriormente.

Probeta 1

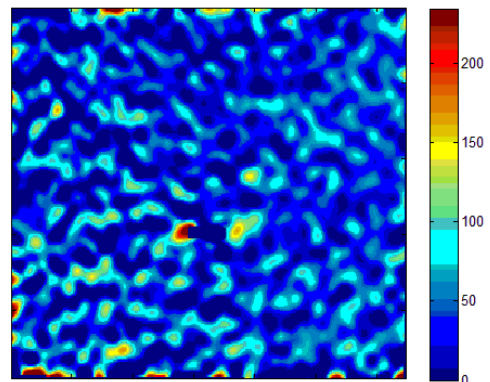
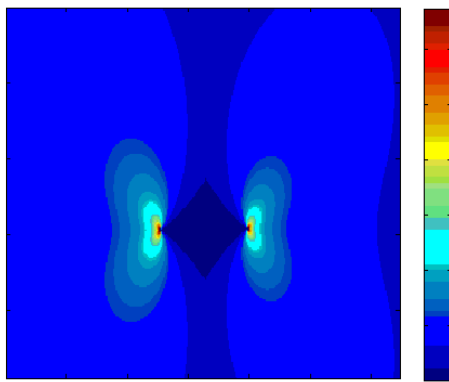
Campos tensoriales teóricos (MPa)

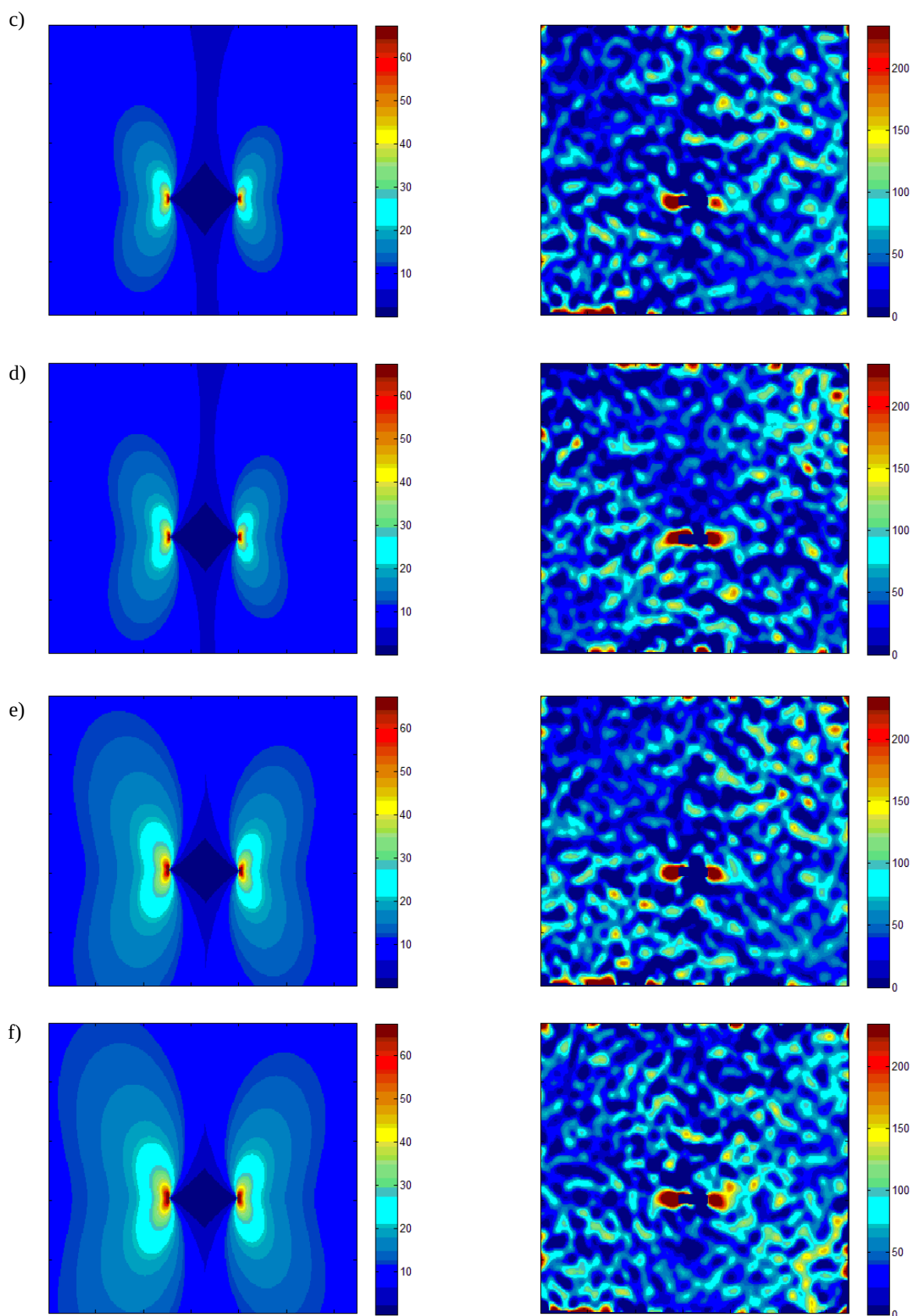
Campos tensoriales experimentales (MPa)

a)



b)





Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



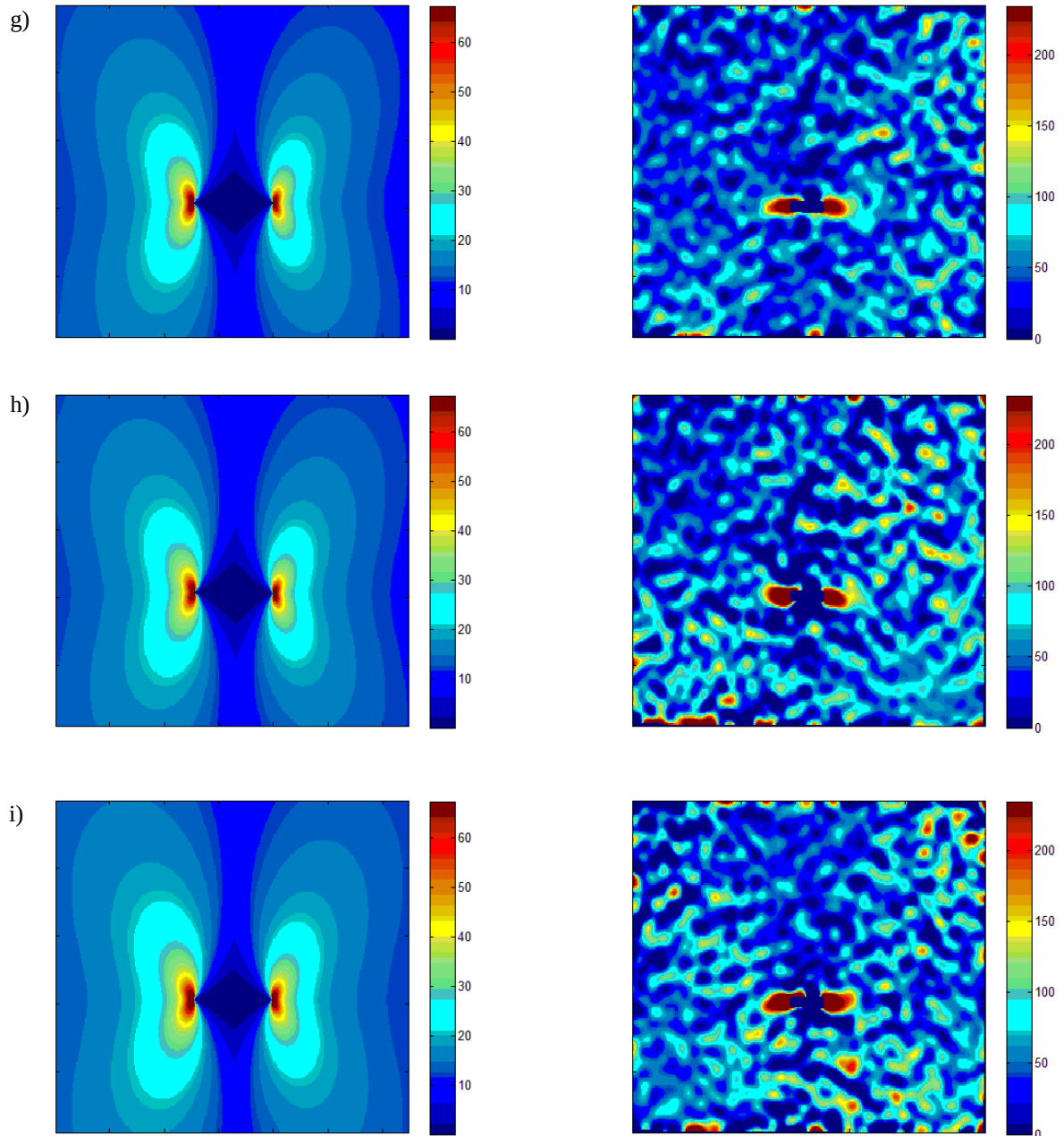


Figura 76: Campos de distribución de tensiones (izquierda teóricos, derecha experimentales) en el eje vertical (MPa) para una longitud de grieta de: grieta izquierda: 4.252 mm y grieta derecha: 3.387 mm; para las siguientes cargas aplicadas: a) 1.4692 kN, b) 1.698 kN, c) 1.9348 kN, d) 2.0352 kN, e) 2.5249 kN, f) 2.7216 kN, g) 3.0548 kN, h) 3.1391 kN, i) 3.392 kN.



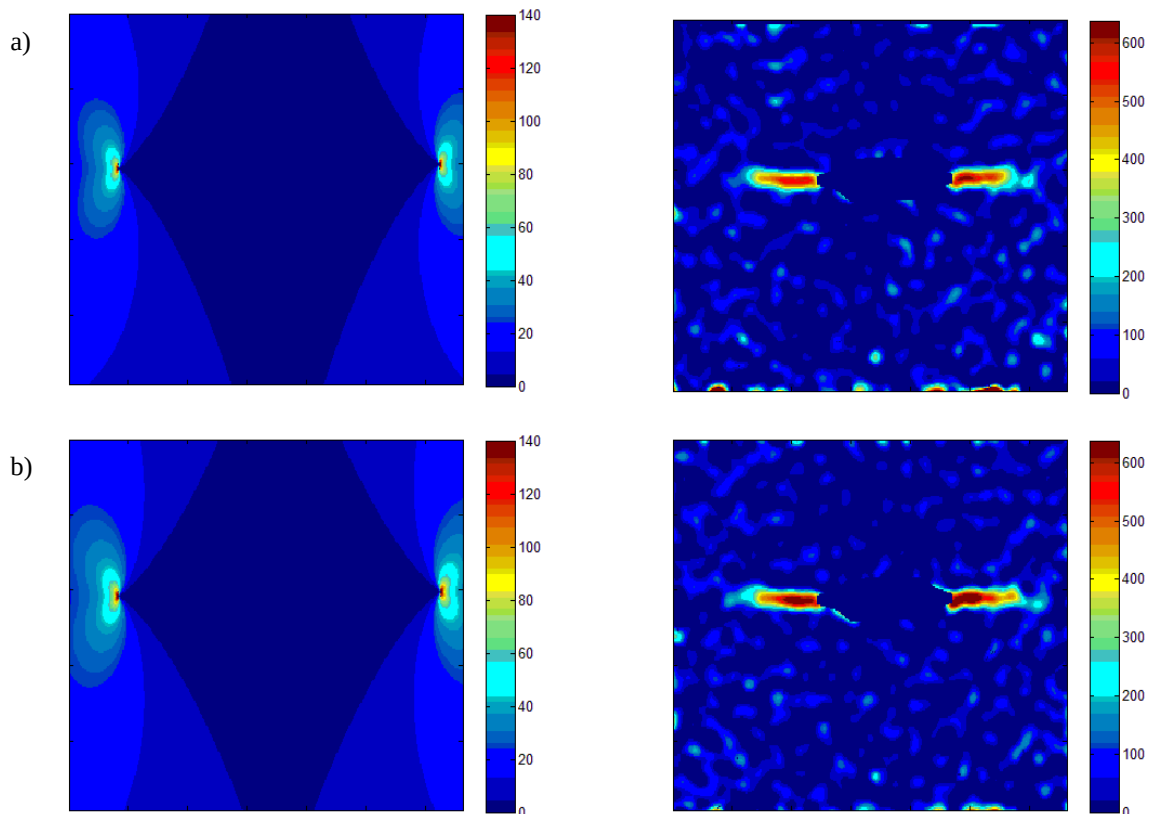
| Imagen | Tensión remota aplicada (MPa) | Valor máximo teórico (MPa) | Valor máximo experimental (MPa) |
|--------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| a)     | 12.24                         | 66.98                      | 265.1                           |
| b)     | 14.15                         | 77.41                      | 260.6                           |
| c)     | 16.12                         | 88.20                      | 344.7                           |
| d)     | 16.96                         | 92.78                      | 362.1                           |
| e)     | 21.04                         | 115.1                      | 400.3                           |
| f)     | 22.68                         | 124.1                      | 441.3                           |
| g)     | 25.46                         | 139.3                      | 334.8                           |
| h)     | 26.16                         | 143.1                      | 530.4                           |
| i)     | 28.27                         | 154.6                      | 547.8                           |

Tabla 3: Valores máximos de tensión teóricos y experimentales para la probeta 1

Probeta 2

Campos tensoriales teóricos (MPa)

Campos tensoriales experimentales (MPa)

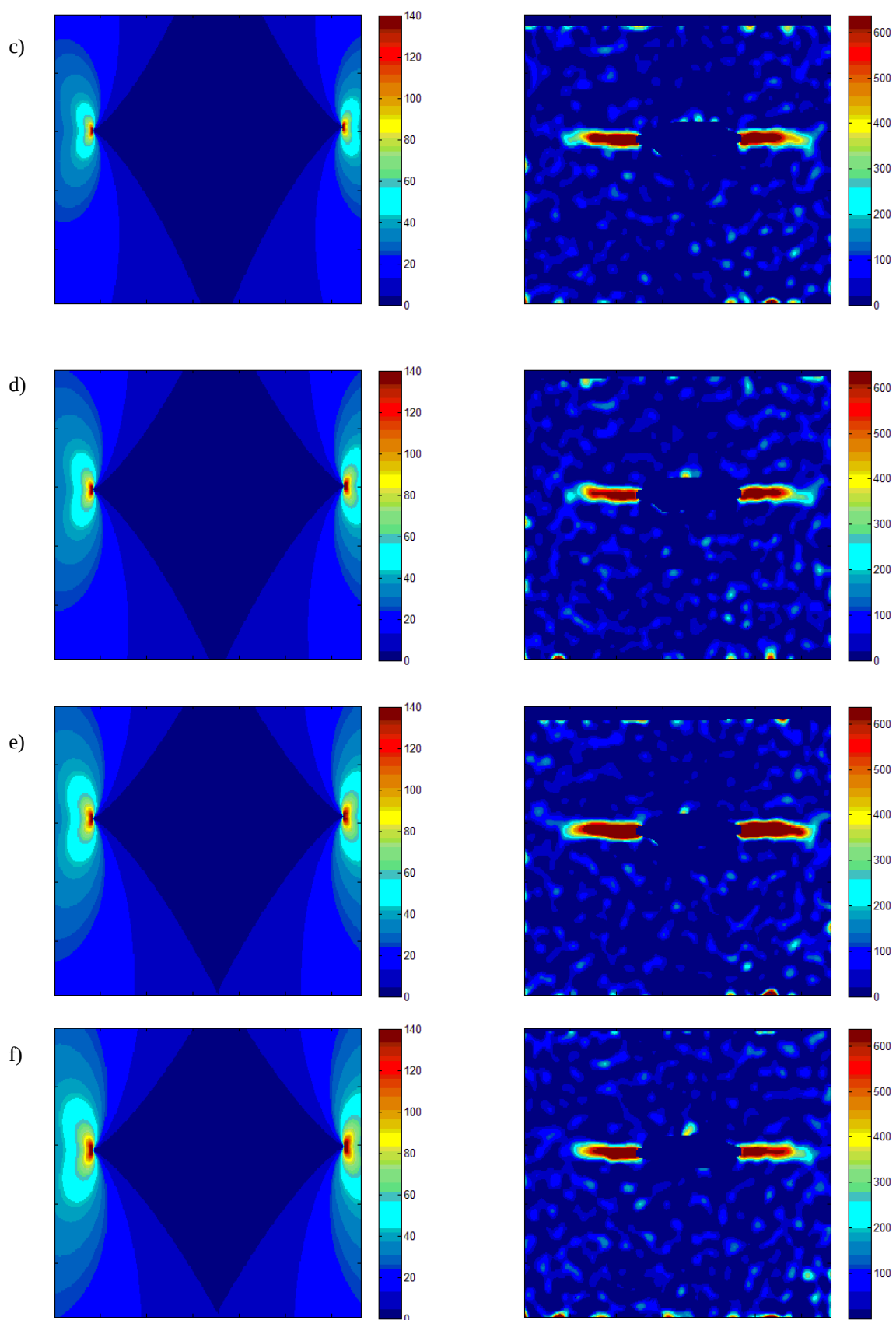


Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



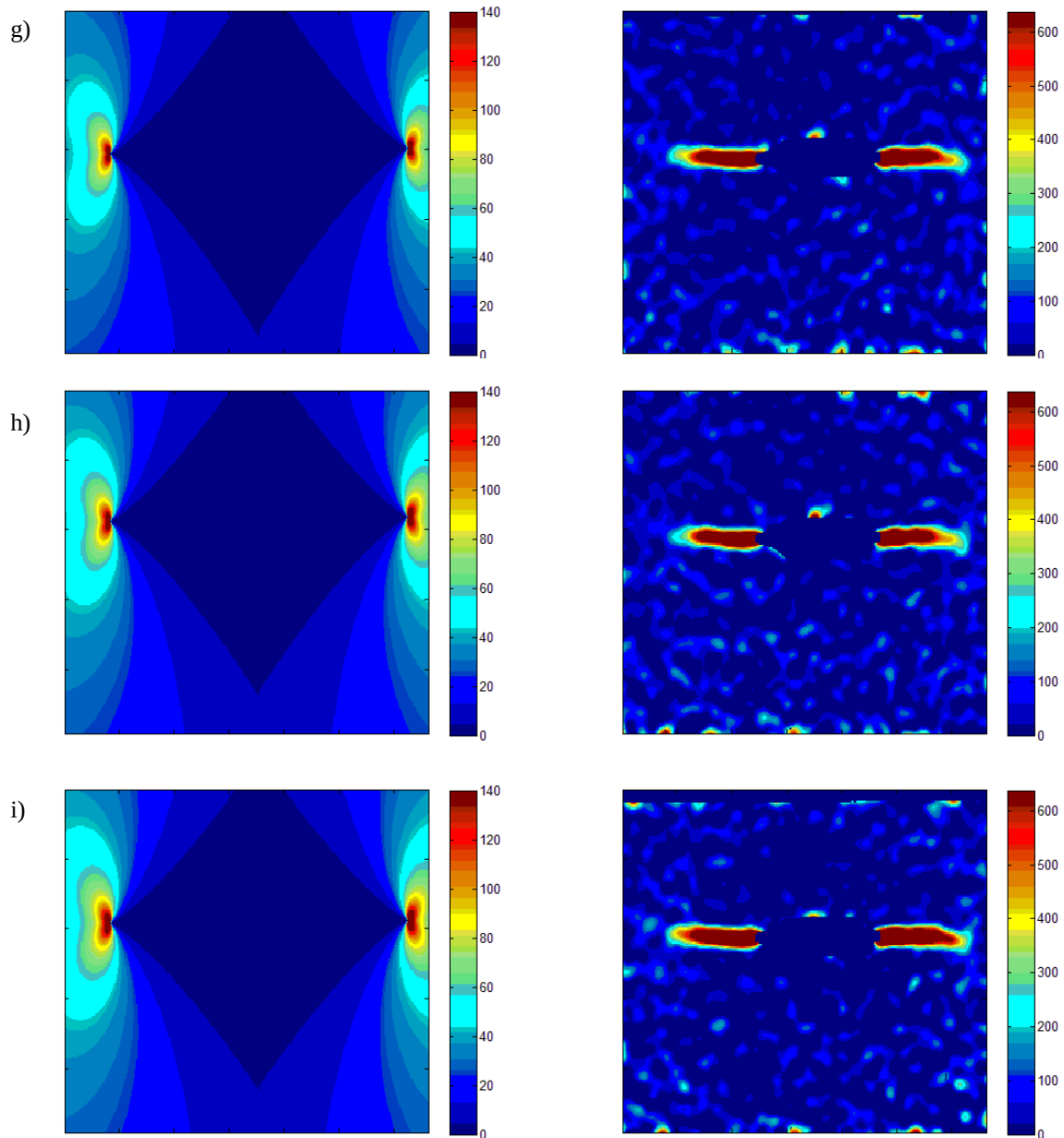


Figura 77: Campos de distribución de tensiones (izquierda teóricos, derecha experimentales) en el eje vertical (MPa) para una longitud de grieta de: grieta izquierda: 8.080 mm y grieta derecha: 8.296 mm; para las siguientes cargas aplicadas: a) 1.3568 kN, b) 1.5495 kN, c) 1.7622 kN, d) 2.0312 kN, e) 2.2078 kN, f) 2.4125 kN, g) 2.6132 kN, h) 2.8099 kN, i) 3.0267 kN.





| Imagen | Tensión remota aplicada (MPa) | Valor máximo teórico (MPa) | Valor máximo experimental (MPa) |
|--------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| a)     | 11.31                         | 142.6                      | 616.22                          |
| b)     | 12.91                         | 162.8                      | 760.43                          |
| c)     | 14.69                         | 185.1                      | 1000.9                          |
| d)     | 16.93                         | 213.4                      | 907.61                          |
| e)     | 18.40                         | 232.0                      | 1370.1                          |
| f)     | 20.10                         | 253.5                      | 954.50                          |
| g)     | 21.78                         | 274.6                      | 1253.2                          |
| h)     | 23.42                         | 295.2                      | 1199.2                          |
| i)     | 25.22                         | 318.0                      | 1410.0                          |

Tabla 4: Valores máximos de tensión teóricos y experimentales para la probeta 2

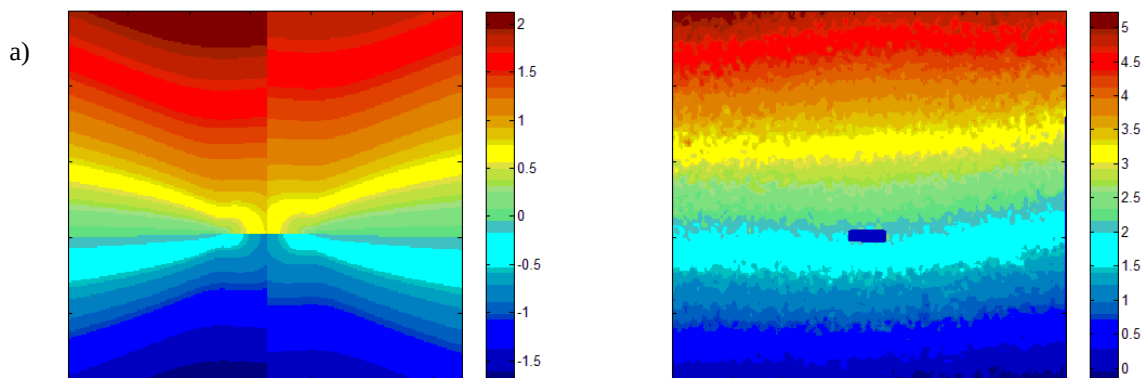
Como puede fácilmente observarse los valores de tensión máxima difieren para las distribuciones teóricas y experimentales en ambas probetas. Esto se debe principalmente a la variación en el campo de distribución de desplazamientos de cada imagen (Tabla 5), ya que al ser derivado para obtener la distribución de deformaciones estas diferencias se acentúan sobremanera, lo que posteriormente recae en esta variación de los campos de tensiones.

A continuación se muestran dos ejemplos para cada probeta.

Probeta 1

Campos de desplazamientos teóricos (mm)

Campos de desplazamientos experimentales





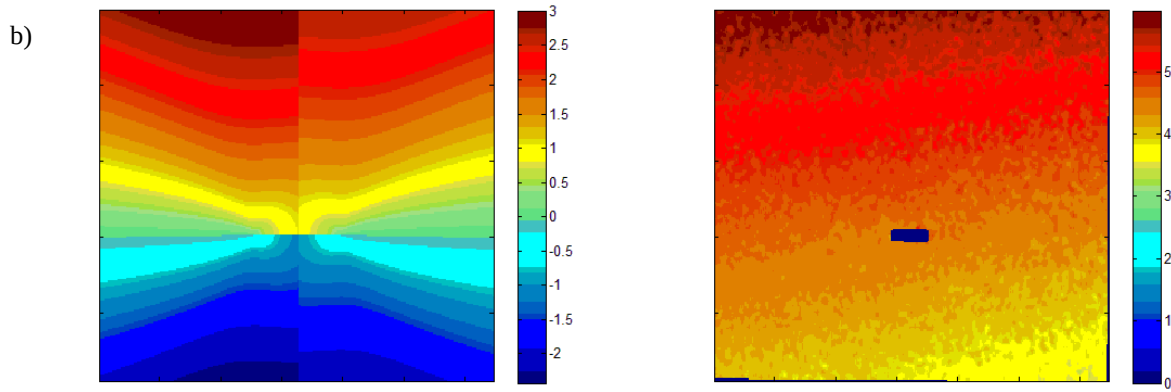
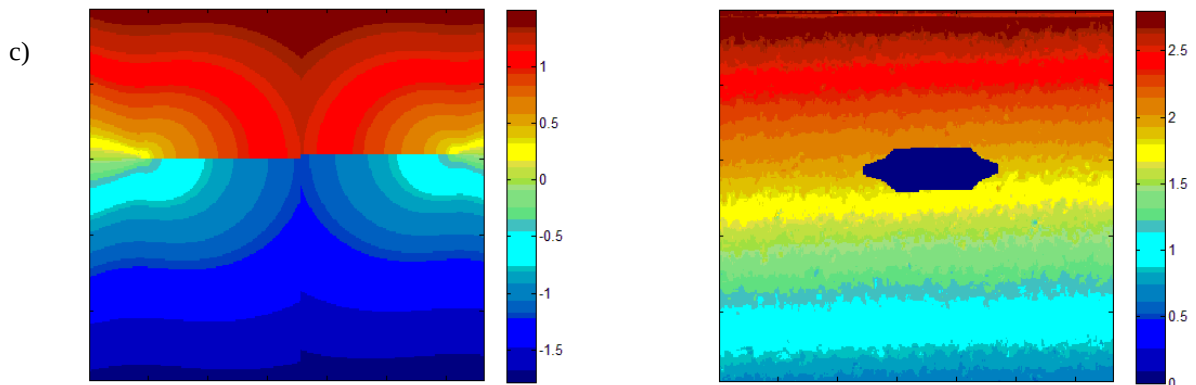


Figura 78: Campos de distribución de desplazamientos (izquierda teóricos, derecha experimentales) en el eje vertical (mm) para una longitud de grieta de: grieta izquierda: 4.252 mm y grieta derecha: 3.387 mm; para las siguientes cargas aplicadas: a) 1.9348 kN, b) 2.7216 kN.

Probeta 2

Campos de desplazamientos teóricos (mm)

Campos de desplazamientos experimentales



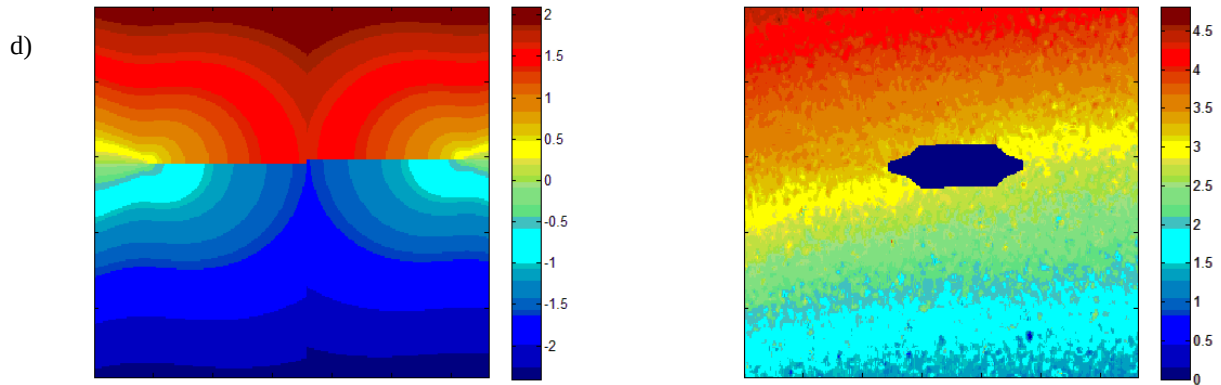


Figura 79: Campos de distribución de desplazamientos (izquierda teóricos, derecha experimentales) en el eje vertical (mm) para una longitud de grieta de: grieta izquierda: 8.080 mm y grieta derecha: 8.296 mm; para las siguientes cargas aplicadas: a) 1.7622 kN, b) 2.4125 kN

| Imagen    | Tensión remota aplicada (MPa) | Valor máximo de desplazamiento teórico (mm) | Valor máximo de desplazamiento experimental (mm) |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Probeta 1 |                               |                                             |                                                  |
| a)        | 16.12                         | 2.1295                                      | 5.2323                                           |
| b)        | 22.68                         | 3.0057                                      | 5.9761                                           |
| Probeta 2 |                               |                                             |                                                  |
| c)        | 14.69                         | 1.4979                                      | 2.682                                            |
| d)        | 20.10                         | 2.0881                                      | 4.641                                            |

Tabla 5: Valores máximos de desplazamiento en el eje vertical teóricos y experimentales para ambas probetas

Como puede observarse los campos de desplazamientos se asemejan más que los campos de distribución tensorial, pero manteniendo considerables diferencias. Como se ha explicado anteriormente, estas diferencias se acentúan al derivar el campo de desplazamientos, lo que desemboca en grandes diferencias en los campos de tensión.



Otras posibles causas de estas diferencias son las siguientes:

- No uniformidad en la aplicación de las cargas: la uniformidad en la aplicación de las cargas depende en gran medida de la calidad de las cuñas de las mordazas y la presión que ejercen sobre la probeta, por lo que un apriete inadecuado puede conllevar una variación en los resultados.
- Movimiento de sólido rígido: derivado del punto anterior, un inadecuado apriete de las mordazas puede conllevar ligeros desplazamientos y rotaciones de la probeta durante el ensayo.
  - Tamaño de speckle incorrecto: el tamaño del moteado de speckle para el análisis por DIC puede resultar incorrecto, especialmente alrededor de los frentes de grieta, por lo que el procesado de las imágenes puede arrojar resultados falsos.

#### 4.3.3. Conclusiones

Como principales conclusiones del presente Trabajo Fin de Grado, y a la vista de los resultados obtenidos en los ensayos, cabe mencionar:

- 1- Se ha comprobado que el sistema hidráulico del puente de carga biaxial estático ha sido satisfactoriamente sustituido por el sistema hidroneumático y reconvertido el puente estático en un puente dinámico.
- 2- El rango de aplicación de cargas se encuentra en 1.2 – 7.5 kN, por lo que una amplia cantidad de materiales pueden ser ensayados sin problemas, siempre que su límite elástico no sea demasiado bajo.
- 3- El no adecuado funcionamiento durante los ensayos se debe principalmente a problemas derivados de las mordazas diseñadas con motivo exclusivo del presente TFG, por lo que es independiente del propio puente de carga. Una futura mejora en el diseño de las mordazas propiciará una mejora sustancial en la calidad de los resultados de los ensayos.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



#### 4.3.4. Líneas de trabajo futuras

Como principal línea de trabajo futuro se presenta la opción de aplicar toda la habilitación aquí descrita al cilindro de aplicación de carga horizontal, consiguiendo una aplicación de ciclos de carga en ambas direcciones, lo que puede resultar extraordinariamente interesante para el estudio de crecimiento de grietas en diferentes ángulos respecto de la horizontal.



# PRESUPUESTO

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## 5. PRESUPUESTO

El presupuesto del proyecto consta principalmente de dos partidas: los componentes de la adaptación a modo de carga dinámica y fabricación de las mordazas de cuña.

### 5.1.Partida correspondiente a COMPONENTES DE ADAPTACIÓN A MODO DE CARGA DINÁMICA

| Referencia                         | DESCRIPCIÓN                               | CANTIDAD | PRECIO | Ud.  | TOTAL  |
|------------------------------------|-------------------------------------------|----------|--------|------|--------|
| <b>COMPONENTES HIDRONEUMÁTICOS</b> |                                           |          |        |      |        |
| CCT100-200                         | Convertidor oleoneumático                 | 1        | 216.54 | €/ud | 216.54 |
| CQ2L160-DCG5644G-101               | Convertidor-multiplicador aire-aceite     | 1        | 551.4  | €/ud | 551.4  |
|                                    | Adaptación de racorería del multiplicador |          |        | €    | 32.38  |
| AW30-F03E                          | Filtro regulador                          | 1        | 35.32  | €/ud | 35.32  |
| Y300T                              | Escuadra fijación                         | 1        | 3.85   | €/ud | 3.85   |
| VHS30-F03-B                        | Válvula de paso de 3 vías                 | 1        | 17.22  | €/ud | 17.22  |
| AN30-03                            | Silenciador 3/8"                          | 1        | 5.26   | €/ud | 5.26   |
| AN20-02                            | Silenciador 1/4"                          | 3        | 2.66   | €/ud | 7.98   |
| KQ2H08-02AS                        | Racor 1/4" para tubo de 8 mm              | 20       | 1.26   | €/ud | 25.2   |
| IR2020-F02G                        | Regulador de presión                      | 1        | 72.25  | €/ud | 72.25  |
| P36202028                          | Escuadra soporte                          | 1        | 0.5    | €/ud | 0.5    |
| EVT317-5DZ-02F-Q                   | Electroválvula de 3 vías                  | 1        | 40.39  | €/ud | 40.39  |
| ITV2050-33F2BN2-Q                  | Transductor de presión                    | 1        | 337.75 | €/ud | 337.75 |

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



|                  |                                        |   |       |      |                      |
|------------------|----------------------------------------|---|-------|------|----------------------|
| KQ2T08-00A       | Racor en T                             | 2 | 2.66  | €/ud | 5.32                 |
| SY7420-5DZ-02F-Q | Electroválvula de 5/3 centros a escape | 1 | 98.16 | €/ud | 98.16                |
| SA014 3/8 1/4    | Racor de reducción                     | 1 | 0.75  | €/ud | 0.75                 |
| TU0805BU-20      | Tubo poliuretano de 8mm (rollo de 20m) | 1 | 23.51 | €/ud | 23.51                |
| <b>SUBTOTAL</b>  |                                        |   |       |      | <b>1473.78 euros</b> |

| <b>COMPONENTES ELÉCTRICOS</b> |                                  |   |       |      |                    |
|-------------------------------|----------------------------------|---|-------|------|--------------------|
|                               | Arduino Mega 2560 REV3           | 1 | 47.19 | €/ud | 47.19              |
|                               | Arduino shield módulo 4 relés 5V | 1 | 18.65 | €/ud | 18.65              |
| <b>SUBTOTAL</b>               |                                  |   |       |      | <b>65.84 euros</b> |

|              |  |  |  |  |                      |
|--------------|--|--|--|--|----------------------|
| <b>TOTAL</b> |  |  |  |  | <b>1539.62 euros</b> |
|--------------|--|--|--|--|----------------------|

La partida de COMPONENTES DE LA ADAPTACIÓN A MODO DE CARGA DINÁMICA asciende a un total de MIL QUINIENTOS TREINTA Y NUEVE EUROS Y SESENTA Y DOS CÉNTIMOS.

## 5.2.Partida correspondiente a FABRICACIÓN DE MORDAZAS DE CUÑA

| DESCRIPCIÓN                                | CANTIDAD | PRECIO | Ud   | TOTAL               |
|--------------------------------------------|----------|--------|------|---------------------|
| Base inferior de mordaza superior extra    | 1        | 59.4   | €/ud | 59.4                |
| Mordazas de precisión con garras templadas | 2        | 713.9  | €/ud | 1427.8              |
| <b>TOTAL</b>                               |          |        |      | <b>1487.2 euros</b> |

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





La partida de FABRICACIÓN DE LAS MORDAZAS DE CUÑA asciende a un total de MIL CUATROCIENTOS OCHENTA Y SIETE EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS.

### 5.3.Presupuesto final

| DESCRIPCIÓN                                                      | PRECIO<br>(€/partida) |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Partida de componentes de adaptación a modo de carga<br>dinámica | 1539.62               |
| Partida de fabricación de mordazas de cuña                       | 1487.2                |
| <b>TOTAL</b>                                                     | <b>3026.82 euros</b>  |

El coste final del proyecto asciende a un total de TRES MIL VEINTISEIS EUROS Y OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS.



# ANEXO I: PLANOS

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## ANEXO I: PLANOS

### ÍNDICE DE PLANOS

- 1 – Base de mordaza – pieza superior
- 2 – Base de mordaza – pieza media
- 3 – Base de mordaza – pieza media con espárrago
- 4 – Base de mordaza – pieza inferior de mordaza superior
- 5 – Base de mordaza – pieza inferior de mordaza inferior
- 6 – Base de mordaza superior completa
- 7 – Base de mordaza inferior completa
- 8 – Base-vástago
- 9 – Bulón
- 10 – Casquillo
- 11 – Chapa-guía
- 12 – Chaveta
- 13 – Contracuña
- 14 – Cuña
- 15 – Empujador
- 16 – Pasador de cuña
- 17 – Tornillo de empujador
- 18 – Tuerca de apriete
- 19 – Ensamblaje de mordaza



## ANEXO II: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para  
Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## ANEXO II: HOJAS DE CARACTERÍSTICAS

ELECTROVÁLVULA 3/2 Ref: EVT317-5DZ-02F-Q

# Electroválvula NC/NA de accionamiento directo de 3 vías

## Corredera sellado elástico

# Serie VT317

**Gran capacidad de caudal y tamaño compacto.**

Dimensiones(W X H X D).....45 X 89.5 X 45  
VT317.....N/min 687.05 1/4

**Adecuado para utilizar en aplicaciones de vacío**

-101.2kPa

(Modelo de vacío: VT/VO317V)

**1 válvula, 6 funciones.**

(Conexión universal)

Las conexiones especiales ofrecen funciones para 6 válvulas diferentes, válvula N.C., válvula N.A., válvula distribuidora, válvula selectora, etc.



### Símbolo



### Modelo

|                               | Montaje unitario | Montaje en bloque |
|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Estándar                      | VT317            | VO317             |
| Largos periodos de activación | VT317E           | VO317E            |
| Vacío                         | VT317V           | VO317V            |

### Bloque

| Modelo | Tipo bloque aplicable     | Accesorios                                           |
|--------|---------------------------|------------------------------------------------------|
| VO317□ | Escape común o individual | Junta tórica (P10-4 uns.)<br>Pernos (M4 X 20-2 uns.) |

### Características estándar

|                                              |                                                                                          |                                                   |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Actuación                                    | Electroválvula monoestable de 2 posición de accionamiento directo                        |                                                   |
| Fluido                                       | Aire comprimido                                                                          |                                                   |
| Rango de presión de trabajo                  | 0 a 0.9MPa                                                                               |                                                   |
| Temperatura ambiente y de fluido             | 0 (Sin congelación) hasta 50 °C                                                          |                                                   |
| Tiempo de respuesta (1)                      | 30ms o menor (0.5MPa)                                                                    |                                                   |
| Frecuencia máx. de trabajo                   | 10Hz                                                                                     |                                                   |
| Lubricación                                  | No necesaria (en caso de utilizar lubricante, utilice aceite de turbina clase 1 ISO VG2) |                                                   |
| Accionamiento manual                         | Pulsador sin enclavamiento                                                               |                                                   |
| Posición de montaje                          | libre                                                                                    |                                                   |
| Impacto/resistencia a las vibraciones (2)    | 150/50m/s²                                                                               |                                                   |
| Protección                                   | A prueba de polvo                                                                        |                                                   |
| Área efectiva mm² (N/min) (3)                | 12.6(687.05)                                                                             |                                                   |
| Peso                                         | 0.29kgf                                                                                  |                                                   |
| Entrada eléctrica                            | Conector DIN                                                                             |                                                   |
| Tensión                                      | AC(50/60Hz)                                                                              | 100, 200, 24*, 48*, 110*, 220*, 240*              |
|                                              | DC                                                                                       | 24, 6*, 12*, 48*, 100*                            |
| Tensión admisible                            | -15% a +10% de tensión nominal                                                           |                                                   |
| Corriente aparente (4)                       | AC                                                                                       | De entrada 19VA (50Hz), 16VA (60Hz)               |
|                                              | Mantenida                                                                                | 11VA (50Hz), 7VA (60Hz)                           |
| Consumo de corriente (4)                     | DC                                                                                       | Sin luz: 6W, con luz: 6.3W                        |
|                                              | AC                                                                                       | ZNR (Varister), luz de neón                       |
| Indicador LED y supresor de picos de tensión | DC                                                                                       | ZNR (Varister), LED (Luz de neón para 100V o más) |

\* Opción

Nota 1) Según test de funcionamiento dinámico JIS B8374-1981 (temperatura de bobina 20C°, a tensión nominal, sin supresor de picos de tensión).

Nota 2) Resistencia a Impactos: supera prueba de Impacto en direcciones paralela y normal al eje. La prueba fue llevada a cabo en dirección al eje y en ángulo recto a la válvula principal y al cuerpo, tanto en el estado activado como desactivado.

Resistencia a vibraciones: supera prueba de barrido de frecuencias entre 45 y 1000 Hz. Las pruebas fueron realizadas tanto en estado activado como desactivado en dirección al eje y en dirección al ángulo recto de la válvula principal y del cuerpo. (Valor en estado inicial).

Nota 3) Este es el valor para la válvula monoestable. Para más información sobre los bloques véase la pág. 1-1056 las "Características del bloque". p.1-1056.

Nota 4) A tensión nominal.



## ELECTROVÁLVULA 5/3 Ref: SY7420-5DZ-02F-Q

# Electroválvula de 5 vías

## Serie SY3000/5000/7000/9000

### Montaje con conexiones neumáticas sobre la válvula

# Unidad simple



Para más información acerca de los productos compatibles con la normativa internacional, consulte la página web [www.smwworld.com](http://www.smwworld.com).

## Forma de pedido

**SY 5 1 20 5 L 01 -Q**

**Serie**

|   |        |
|---|--------|
| 3 | SY3000 |
| 5 | SY5000 |
| 7 | SY7000 |
| 9 | SY9000 |

**Tipo de función**

|   |                                          |
|---|------------------------------------------|
| 1 | 2 pos., monoestable (A/B) (EA/P/ER)      |
| 2 | 2 pos., bistable (A/B) (EA/P/ER)         |
| 3 | 3 pos., centro cerrado (A/B) (EA/P/ER)   |
| 4 | 3 pos., centro a escape (A/B) (EA/P/ER)  |
| 5 | 3 pos., centro a presión (A/B) (EA/P/ER) |

**Características técnicas de la bobina**

|   |                                                     |
|---|-----------------------------------------------------|
| - | Estándar                                            |
| T | Con circuito de ahorro de energía (sólo 24, 12 VCC) |

• El circuito de ahorro de energía no está disponible en los modelos D, DO y W.

**Para VCC**

|   |        |
|---|--------|
| S | 24 VCC |
| V | 12 VCC |
| W | 6 VCC  |
| S | 5 VCC  |
| R | 3 VCC  |

**Para Vca (50/60 Hz)**

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1 | 100 VCA           |
| 2 | 200 VCA           |
| 3 | 110 VCA (115 VCA) |
| 4 | 220 VCA (230 VCA) |

**Tensión nominal**

• Para Vcc, modelos D y DO sólo disponible para 12 y 24 Vcc.  
• Vca sólo disponibles con modelos D y DO.

**Entrada eléctrica**

| 24, 12, 6, 5, 3 VCC          |                                |                             |                              | M, 12 VCC        |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|
| Salida directa a cable       | Conector enchufable L          | Conector enchufable M       | Conector DIN                 | Conector DIN     |
| G: Longitud del cable 300 mm | L: Con cable (longitud 300 mm) | M: Con cable (long. 300 mm) | MN: Sin cable (long. 300 mm) | D: Con Conector  |
| H: Longitud del cable 500 mm | LN: Sin cable                  | LO: Sin conector            | MO: Sin conector             | DO: Sin conector |

**24, 12, 6, 5, 3 VCC**

**Conector M8**

WC: Con conector

Nota 1)

• Modelos LN y MN: con 2 terminales.  
• Para ver detalles acerca del conector DIN de la serie SY3000, consulte el anexo pág. 10.  
• El modelo con conector DIN "Y" de conformidad con EN-175301-803C (antigua DIN43650C) también está disponible. Para ver más detalles, consulte la pág. 210.  
• Para más información acerca del cable del conector M8, consulte el anexo pág. 12.  
• El conector M8 tipo "WA" conforme a la norma IEC 60947-5-2 también está disponible. Para más detalles, véase la pág. 211.  
Nota 1) Introduzca los símbolos de longitud de cable en □. Asegúrese de rellenar los espacios en blanco referentes al anexo pág. 13.  
Nota 2) Excepto SY3000.

**Tamaño de conexión A, B**

**Conexión roscada**

| Simb. | Tamaño conexión | Serie aplicable |
|-------|-----------------|-----------------|
| M5    | M5              | SY3000          |
| 01    | 1/8             | SY5000          |
| 02    | 1/4             | SY7000          |
| 03    | 3/8             | SY9000          |

**Conexión Instantánea (Sistema métrico)**

| Simb. | Tamaño conexión                 | Serie aplicable |
|-------|---------------------------------|-----------------|
| C4    | Conexión instantánea para ø1/8" | SY3000          |
| C6    | Conexión instantánea para ø1/4" | SY5000          |
| C8    | Conexión instantánea para ø3/8" | SY7000          |
| C10   | Conexión instantánea para ø1/2" | SY9000          |
| C12   | Conexión instantánea para ø3/4" | SY9000          |

**Conexión Instantánea (pulgadas)**

| Simb. | Tamaño conexión                 | Serie aplicable |
|-------|---------------------------------|-----------------|
| N3    | Conexión instantánea para ø1/8" | SY3000          |
| N7    | Conexión instantánea para ø1/4" | SY5000          |
| N9    | Conexión instantánea para ø3/8" | SY7000          |
| N11   | Conexión instantánea para ø1/2" | SY9000          |
| N11   | Conexión instantánea para ø3/4" | SY9000          |

**Fijación**

- Sin fijación

F1: Con escudera (sólo monoestable de 2 pos.)

F2: Con fijación lateral

• SY9000 no tiene fijación.

**Modelo rosca**

| Simb. | Rc   |
|-------|------|
| F     | G    |
| N     | NPT  |
| T     | NPTF |

• Excepto para M5

**Accionamiento manual**

- Pulsador sin enclavamiento

D: Enclavamiento para destornillador

E: Enclavamiento con mando giratorio

**LED/supresor de picos de tensión**

Para entradas eléctricas de tipo G, H, L, M y W

| Simb. | Descripción                                          |
|-------|------------------------------------------------------|
| -     | Sin LED/supresor de picos de tensión                 |
| S     | Con supresor de picos de tensión                     |
| Z     | Con LED/supresor de picos de tensión                 |
| R     | Con supresor de picos de tensión (sin polaridad)     |
| U     | Con LED/supresor de picos de tensión (sin polaridad) |

• El circuito de ahorro de energía sólo está disponible en el tipo "Z".

Para entrada eléctrica tipo 1 (excepto SY3000)

| Simb. | Descripción                          |
|-------|--------------------------------------|
| -     | Sin LED/supresor de picos de tensión |
| S     | Con supresor de picos de tensión     |
| Z     | Con LED/supresor de picos de tensión |

• DOZ no disponible.  
• Para las válvulas de Vcc no existe la opción "S". Ya está integrada en el circuito rectificador.

Nota) Al realizar un pedido para electroválvulas de montaje con conexiones neumáticas sobre la válvula como una sola unidad, los pormos de montaje y las juntas de estanqueidad no están incluidas. Pídalas por separado si es necesario. (Para más detalles, véase pág. 56.)



## SY3000/5000/7000/9000

### Montaje con conexiones neumáticas sobre la válvula

#### Características técnicas



| Serie                                                       |                                | SY3000                                                                                           | SY5000 | SY7000 | SY9000 |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Fluido                                                      |                                | Aire                                                                                             |        |        |        |
| Rango de presión de trabajo (MPa)                           | 2 posiciones, monoestable      | 0.15 a 0.7                                                                                       |        |        |        |
|                                                             | 2 posiciones, biestable        | 0.1 a 0.7                                                                                        |        |        |        |
|                                                             | 3 posiciones                   | 0.2 a 0.7                                                                                        |        |        |        |
| Temperatura ambiente y de fluido (°C)                       |                                | -10 a 50 (Sin congelación. Consulte el anexo pág. 3)                                             |        |        |        |
| Frecuencia máx. de trabajo (Hz)                             | 2 pos., monoestable, biestable | 10                                                                                               | 5      | 5      | 5      |
|                                                             | 3 posiciones                   | 3                                                                                                | 3      | 3      | 3      |
| Accionamiento manual (Funcionamiento manual)                |                                | Pulsador sin enclavamiento.<br>Enclavamiento para desarmador. Enclavamiento con mando giratorio. |        |        |        |
| Método de escape pilotaje                                   |                                | Escape común para válvula principal y válvula de pilotaje                                        |        |        |        |
| Lubricación                                                 |                                | No necesaria                                                                                     |        |        |        |
| Posición de montaje                                         |                                | Cualquiera                                                                                       |        |        |        |
| Resistencia a impactos/vibraciones (m/s²) <sup>(Nota)</sup> |                                | 150/30                                                                                           |        |        |        |
| Protección                                                  |                                | A prueba de polvo (+ conector DIN y conector M8: IP65)                                           |        |        |        |



\* Basado en IEC60529

Nota) Resistencia a impactos: Supera la prueba de impacto a lo largo del eje y en ángulo recto con respecto a la válvula principal y al cuerpo, tanto en estado activado como en estado desactivado (valores en el estado inicial).

Resistencia a vibraciones: Supera prueba de bambo de frecuencias entre 45 y 2000 Hz. Las pruebas se llevan a cabo con respecto a la válvula principal y la armadura, tanto en estado activado como en estado desactivado (valor en estado inicial).



#### Ejecuciones especiales

(Consulte las págs 199 y 213 para ver más detalles)

#### Características de las electroválvulas

| Entrada eléctrica                    |                                                      | Salida directa a cable (G), (H)<br>Conector enchufable L (L)<br>Conector enchufable M (M) | Conector DIN (D)<br>Conector M8 (W)                      |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                                      |                                                      | G, H, L, M, W                                                                             | D, D0                                                    |
| Tensión de la bobina (V)             | CC                                                   | 24, 12, 6, 5, 3                                                                           | 24, 12                                                   |
|                                      | CA 50/60 Hz                                          |                                                                                           | 200, 220, 100, 110                                       |
| Fluctuación de tensión admisible (%) | ±10% de la tensión nominal*                          |                                                                                           |                                                          |
| Consumo de potencia (W)              | CC                                                   | Estándar                                                                                  | 0.35 (con indicador LED: 0.4 terminal DIN con LED: 0.45) |
|                                      |                                                      | Constante de ahorro de energía                                                            | 0.1 (sólo con LED indicador)                             |
| Potencia aparente (VA) *             | CA                                                   | 100 V                                                                                     | 0.78 (con LED indicador: 0.87)                           |
|                                      |                                                      | 110 V                                                                                     | 0.86 (con LED indicador: 0.97)                           |
|                                      |                                                      | [115 V]                                                                                   | 1.04 (con LED indicador: 1.07)                           |
|                                      |                                                      | 200 V                                                                                     | 1.15 (con LED indicador: 1.39)                           |
|                                      |                                                      | 220 V                                                                                     | 1.27 (con LED indicador: 1.46)                           |
|                                      |                                                      | [230 V]                                                                                   | 1.39 (con LED indicador: 1.60)                           |
| Supresor de picos de tensión         | Diodo (Varistor para terminal DIN y modelo no polar) |                                                                                           |                                                          |
| Indicador LED                        | LED (CA del conector DIN es una luz de neón)         |                                                                                           |                                                          |



\* En común entre 110 VCA y 115 VCA y entre 220 VCA y 230 VCA.

\* Para 115 VCA y 230 VCA la tensión permitida es de -15% a +5% de la tensión nominal.

\* Los tipos S, Z y T (con circuito de ahorro de energía) deben mantenerse dentro del siguiente rango de fluctuación de tensión permitido debido a una caída de tensión causada por el circuito interno.

Tipo S y Z: 24 VCC: -7% a +10%  
12 VCC: -4% a +10%

Tipo T: 24 VCC: -8% a +10%  
12 VCC: -6% a +10%

#### Tiempo de respuesta



Nota) Según el test de actuación dinámico, JIS B 8375-1981. (Temperatura de bobina 20°C, a tensión nominal, sin supresor de picos.)

#### SY3000

| Tipo de función     | Tiempo de respuesta (ms) (a 0.5 MPa)  |                                       |            |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
|                     | Sin LED/ supresor de picos de tensión | Con LED/ supresor de picos de tensión | Tipos S, Z |
| 2 pos., monoestable | 12 máx.                               | 15 máx.                               | 12 máx.    |
| 2 pos., biestable   | 10 máx.                               | 13 máx.                               | 10 máx.    |
| 3 posiciones        | 15 máx.                               | 20 máx.                               | 16 máx.    |

#### SY5000

| Tipo de función     | Tiempo de respuesta (ms) (a 0.5 MPa)  |                                       |            |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
|                     | Sin LED/ supresor de picos de tensión | Con LED/ supresor de picos de tensión | Tipos S, Z |
| 2 pos., monoestable | 19 máx.                               | 26 máx.                               | 19 máx.    |
| 2 pos., biestable   | 18 máx.                               | 22 máx.                               | 18 máx.    |
| 3 posiciones        | 32 máx.                               | 38 máx.                               | 32 máx.    |

#### SY7000

| Tipo de función     | Tiempo de respuesta (ms) (a 0.5 MPa)  |                                       |            |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
|                     | Sin LED/ supresor de picos de tensión | Con LED/ supresor de picos de tensión | Tipos S, Z |
| 2 pos., monoestable | 31 máx.                               | 38 máx.                               | 33 máx.    |
| 2 pos., biestable   | 27 máx.                               | 30 máx.                               | 28 máx.    |
| 3 posiciones        | 50 máx.                               | 56 máx.                               | 50 máx.    |

#### SY9000

| Tipo de función     | Tiempo de respuesta (ms) (a 0.5 MPa)  |                                       |            |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
|                     | Sin LED/ supresor de picos de tensión | Con LED/ supresor de picos de tensión | Tipos S, Z |
| 2 pos., monoestable | 35 máx.                               | 41 máx.                               | 35 máx.    |
| 2 pos., biestable   | 35 máx.                               | 41 máx.                               | 35 máx.    |
| 3 posiciones        | 62 máx.                               | 64 máx.                               | 62 máx.    |



## Serie SY7000

| Mod. de válvula  | Tipo de función | Tamaño conex.          |                                        | Características de caudal  |             |             |               |                            |             |             |               | Peso (g)               |                       |              |               |
|------------------|-----------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|---------------|----------------------------|-------------|-------------|---------------|------------------------|-----------------------|--------------|---------------|
|                  |                 | 1, 5, 3<br>(P, EA, EB) | 4, 2<br>(A, B)                         | 1→4/2 (P→A/B)              |             |             |               | 4/2→5/3 (A/B→EA/EB)        |             |             |               | Salida directa a cable | Conec. enchufable L/M | Terminal DIN | W M8 conector |
|                  |                 |                        |                                        | C (dm <sup>3</sup> /s-bar) | b           | Cv          | Q(l/min(ANR)) | C (dm <sup>3</sup> /s-bar) | b           | Cv          | Q(l/min(ANR)) |                        |                       |              |               |
| SY7□20<br>-□-02  | 2 pos.          | Individual             | 1/4                                    | 4.1                        | 0.23        | 0.93        | 999           | 3.3                        | 0.33        | 0.81        | 855           | 101                    | 104                   | 125          | 108           |
|                  |                 | Doble                  |                                        |                            |             |             |               |                            |             |             |               | 120                    | 125                   | 167          | 133           |
|                  | 3 pos.          | Centro cerrado         |                                        | 2.9                        | 0.31        | 0.70        | 742           | 2.4                        | 0.38        | 0.63        | 644           |                        |                       |              |               |
|                  |                 | Centro a escape        |                                        | 2.5                        | 0.39        | 0.65        | 675           | 3.4 (2.1)                  | 0.35 (0.38) | 0.82 (0.54) | 893 (563)     | 128                    | 133                   | 175          | 141           |
| SY7□20<br>-□-C8  |                 | Centro a presión       | C8<br>(Conexión instantánea para ø8)   | 4.3 (2.4)                  | 0.23 (0.32) | 0.97 (0.61) | 1048 (618)    | 2.2                        | 0.39        | 0.58        | 594           |                        |                       |              |               |
|                  | 2 pos.          | Individual             |                                        | 3.2                        | 0.26        | 0.77        | 794           | 3.2                        | 0.37        | 0.82        | 852           | 107                    | 110                   | 131          | 114           |
|                  |                 | Doble                  |                                        |                            |             |             |               |                            |             |             |               | 126                    | 132                   | 174          | 140           |
|                  | 3 pos.          | Centro cerrado         |                                        | 2.6                        | 0.24        | 0.63        | 637           | 2.4                        | 0.31        | 0.62        | 614           |                        |                       |              |               |
| SY7□20<br>-□-C10 |                 | Centro a escape        | C10<br>(Conexión instantánea para ø10) | 2.4                        | 0.25        | 0.57        | 592           | 2.6 (1.9)                  | 0.42 (0.46) | 0.70 (0.56) | 718 (541)     | 134                    | 140                   | 182          | 148           |
|                  |                 | Centro a presión       |                                        | 3.3 (2.4)                  | 0.28 (0.22) | 0.78 (0.57) | 829 (581)     | 2.2                        | 0.34        | 0.60        | 574           |                        |                       |              |               |
|                  | 2 pos.          | Individual             |                                        | 3.8                        | 0.26        | 0.86        | 943           | 3.2                        | 0.34        | 0.82        | 835           | 103                    | 105                   | 126          | 109           |
|                  |                 | Doble                  |                                        |                            |             |             |               |                            |             |             |               | 122                    | 127                   | 169          | 135           |
| SY7□20<br>-□-C10 | 3 pos.          | Centro cerrado         | C10<br>(Conexión instantánea para ø10) | 2.8                        | 0.27        | 0.67        | 699           | 2.4                        | 0.21        | 0.59        | 578           |                        |                       |              |               |
|                  |                 | Centro a escape        |                                        | 2.5                        | 0.25        | 0.59        | 616           | 2.7 (2.0)                  | 0.38 (0.38) | 0.70 (0.56) | 724 (536)     | 130                    | 135                   | 177          | 143           |
|                  |                 | Centro a presión       |                                        | 3.8 (2.4)                  | 0.25 (0.31) | 0.89 (0.61) | 937 (614)     | 2.3                        | 0.38        | 0.61        | 617           |                        |                       |              |               |



Nota) ( ): indica la posición normal.

\* Estos valores se han calculado según la norma ISO 6358 y corresponden al caudal medido en condiciones estándar a una presión de alimentación de 0.6 MPa (presión relativa) y a una presión diferencial de 0.1 MPa.





# FILTRO REGULADOR Ref: AW30-F03E

## 2. APPLICATION

This instrument aims at eliminating excess saturated water of the air line and solid foreign material, pressure controlling of air lines.

## 3. SPECIFICATIONS

| Model                             | AW10                                                              | AW20     | AW30         | AW40          | AW40-06 | AW60   |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------------|---------|--------|
| Port size                         | M5                                                                | 1/8, 1/4 | 1/4, 3/8     | 1/4, 3/8, 1/2 | 3/4     | 4/3, 1 |
| Fluid                             | Air                                                               |          |              |               |         |        |
| Proof pressure                    | 1.5MPa                                                            |          |              |               |         |        |
| Max. operating pressure           | 1.0MPa                                                            |          |              |               |         |        |
| Set pressure range                | 0.05~0.7MPa                                                       |          | 0.05~0.85MPa |               |         |        |
| Note1) Gauge port size            | Note2) 1/16                                                       | 1/8      | 1/8          | 1/4           | 1/4     | 1/4    |
| Relieving pressure                | Set pressure plus 0.05MPa [When relieving flow is 0.1L/min (ANR)] |          |              |               |         |        |
| Ambient and fluid temperature     | -5~60°C (Should be no freezing)                                   |          |              |               |         |        |
| Filtration                        | 5 μm                                                              |          |              |               |         |        |
| Drain capacity (cm <sup>3</sup> ) | 2.5                                                               | 8        | 25           | 45            | 45      | 45     |
| Construction                      | 0.75kg                                                            |          |              |               |         |        |
| Weight (kg)                       | 0.09kg                                                            | 0.32kg   | 0.40kg       | 0.72kg        | 0.75kg  | 2.00kg |
| Note4) Bowl guard                 | ×                                                                 | △        | ○            | ○             | ○       | ○      |

Note1) Square embedded pressure gauge (AW20~60). Without pressure gauge mounting threads.

Note2) Use bush(part no. 131368) when connecting pressure gauge port size R1/8 to R1/16.

Note3) Except AW10.

Note4) ○: Combinable to standard △: Combinable to option ×: Impossible

## 4. HOW TO ORDER

**AW 30 - E 03 BG - N**

**Filter regulator**

**Body size**

|    |
|----|
| 10 |
| 20 |
| 30 |
| 40 |
| 60 |

**Thread**

| NIL      | Meter thread(M5) |
|----------|------------------|
|          | Rc               |
| Note1) N | NPT              |
| Note2) F | G                |

Note1) Drain guide(Bore size): NPT 1/8(AW10~20)  
NPT 1/4(AW30~60)

Note2) Drain guide(Bore size): G 1/8(AW20)  
G 1/4(AW30~60)

**Port size**

| M5 | M5  |
|----|-----|
| 01 | 1/8 |
| 02 | 1/4 |
| 03 | 3/8 |
| 04 | 1/2 |
| 06 | 3/4 |
| 10 | 1   |

**Option**

| Symbol   | Description                                         | Applicable model |
|----------|-----------------------------------------------------|------------------|
| Nil      | —                                                   | AW10~60          |
| Note4) 1 | Setting pressure 0.02~0.2MPa                        | AW10~60          |
| 2        | Metal bowl                                          | AW10~60          |
| 6        | Nylon bowl                                          | AW10~60          |
| 8        | Metal bowl with sight glass                         | AW30~60          |
| C        | Bowl guard                                          | AW20             |
| Note5) J | With drain guide 1/8                                | AW20             |
|          | With drain guide 1/4                                | AW30~60          |
| N        | Non-relieving style                                 | AW10~60          |
| R        | Flow direction: From right to left                  | AW10~60          |
| W        | With drain cock and barb fitting (For nylon φ6×φ4)  | AW30~60          |
| Note6) Z | Nameplate, Pressure gauge Unit: PSI <sup>1)</sup> F | AW10~60          |

When specifying more than one option, indicate symbols numerically then alphabetically.

Note4) Only the adjusting spring is different from the standard model.  
Max. outlet pressure is 0.2MPa or more and it might go up.

Note5) Without valve function.

Note6) Thread: NPT  
Z is applicable to only overseas because of new measurement law in Japan(SI unit).

**Accessory** Note3)

| Symbol | Description                                           | Applicable model |
|--------|-------------------------------------------------------|------------------|
| Nil    | —                                                     | AW10~60          |
| B      | With Bracket                                          | AW20~60          |
| C      | With float auto drain (N.C.)                          | AW20~60          |
| D      | With float auto drain (N.O.)                          | AW30~60          |
| E      | Square embedded pressure gauge (With limit indicator) | AW20~60          |
| G      | Circular gauge (Without limit indicator)              | AW10             |
|        | Circular gauge (With limit indicator)                 | AW20~60          |
| H      | Panel mounting (With set nut)                         | AW10~40          |

Note3) Accessory is packed together and is not mounted.  
(Except type C,D,E)



MULTIPLICADOR DE PRESIÓN Ref: CQ2L160-DCG5644G-101

## Hydraulic Related Equipment / Air-Hydro Booster

### Specifications

| Part number                                              | CQ2L160-DCG5643G-17            | CQ2L160-DCG5644G-101 | CQ2L100-Z4195-60   | CQ2L140-DCG5645G-17 | CQ2F100-Z4239-60   | CQ2LH160-DCG864AG-105 | CQ2LH160-20-DCI9145I |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| Air pressure cylinder diameter                           | ø160                           | ø160                 | ø100               | ø140                | ø100               | ø160                  | ø160                 |
| Pressure increase ratio                                  | 1 : 7                          | 1 : 10               | 1 : 13             | 1 : 15              | 1 : 16             | 1 : 25                | 1 : 32.6             |
| Amount of discharged oil                                 | 17 cm <sup>3</sup>             | 101 cm <sup>3</sup>  | 60 cm <sup>3</sup> | 17 cm <sup>3</sup>  | 60 cm <sup>3</sup> | 105 cm <sup>3</sup>   | 20 cm <sup>3</sup>   |
| Maximum working pressure (air pressure)                  | 1.0 MPa                        |                      |                    |                     | 0.87 MPa           | 0.56 MPa              | 0.43 MPa             |
| Generated hydraulic pressure (with 0.8 MPa air pressure) | 3.5 MPa                        | 5.0 MPa              | 6.5 MPa            | 7.5 MPa             | 8.0 MPa            | 12.5 MPa              | 14 MPa               |
| Fluid                                                    | Air                            |                      |                    |                     |                    |                       |                      |
| Hydraulic pressure                                       | Turbine oil class 1 (ISO VG32) |                      |                    |                     |                    |                       |                      |
| Ambient and fluid temperature                            | 5 to 60°C                      |                      |                    |                     |                    |                       |                      |
| Oil pot                                                  | With oil pot                   | With oil pot         | With oil pot       | With oil pot        | Without oil pot    | Without oil pot       | With oil pot         |

REGULADOR DE PRESIÓN Ref: IR2020-F02G

### 1. Specifications

| Model                            | IR2000                                               | IR2010      | IR2020      |
|----------------------------------|------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| Max. supply pressure             | MAX. 1.0MPa                                          |             |             |
| (Note 1)<br>Min. supply pressure | Setting pressure + 0.05MPa                           |             |             |
| Setting pressure                 | 0.005~0.2MPa                                         | 0.01~0.4MPa | 0.01~0.8MPa |
| Setting sensitivity              | (Note 2)<br>Within 0.2% F.S.                         |             |             |
| (Note 3)<br>Repeatability        | (Note 2)<br>Within • 0.5% F.S.                       |             |             |
| (Note 4)<br>Air consumption      | 4.4L/min(ANR) or less (at supply pressure of 1.0MPa) |             |             |
| Ambient and fluid temperature    | -5 to 60°C (No freezing)                             |             |             |
| Port size                        | Rc1/4                                                |             |             |
| Port size of pressure gauge      | Rc1/8 [2 places]                                     |             |             |
| Weight                           | 0.30kg                                               |             |             |

(Note1) •• The specifications are for conditions of no flow at the output side. Be sure to keep the minimum supply pressure (setting pressure + 0.05MPa).

(Note2) •• The full span means the condition at the maximum set pressure of the product. (F.S. • 0.2MPa, IR2000)

(Note3) •• Indicates the set pressure fluctuation of the secondary side for every ON-OFF(excluding the change over time and the temperature) ••

(Note4)•• Air is released to atmosphere all the time.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## REGULADOR ELECTRONEUMÁTICO Ref: ITV2050-33F2BN2-Q

| Modelo                           |               | ITV2010 - X156                                                                                | ITV2030 - X156                      | ITV2050 - X156 |
|----------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
|                                  |               | ITV3010 - X38                                                                                 | ITV3030 - X38                       | ITV3050 - X38  |
| Mín. presión de alimentación     |               | Presión de ajuste + 0.1 MPa                                                                   |                                     |                |
| Máx. presión de alimentación     |               | 0.2 MPa (2.0 kgf/cm <sup>2</sup> )                                                            | 1.0 MPa (10.2 kgf/cm <sup>2</sup> ) |                |
| Rango de presión de ajuste       |               | 0.005-0.1MPa                                                                                  | 0.005-0.5MPa                        | 0.005-0.9MPa   |
| Máx. índice de flujo             |               | 1500 l/ min (ANR) ITV20** (ALIM.: a 0.7 MPa)<br>5.000 l/ min (ANR) ITV30** (ALIM.: a 0.7 MPa) |                                     |                |
| Tensión de alimentación          |               | 24 Vcc±10%                                                                                    |                                     |                |
| Consumo de corriente             |               | 0.12A o menos (con salida constante)                                                          |                                     |                |
| Señal de entrada                 |               | 4 bit (entrada paralela)                                                                      |                                     |                |
| Impedancia de entrada            |               | 4.7 kΩ o menos                                                                                |                                     |                |
| Señal de salida                  |               | Colector abierto NPN: 30V 30mA<br>Colector abierto PNP: 30V 30mA                              |                                     |                |
| Linealidad de salida             |               | ±1% o menos (F.S.)                                                                            |                                     |                |
| Repetitividad                    |               | ±0,5% o menos (F.S.)                                                                          |                                     |                |
| Sensibilidad                     |               | 0,2% o menos (F.S.)                                                                           |                                     |                |
| Características de temperatura   |               | ±0,12% o menos (F.S.)/ °C                                                                     |                                     |                |
| Estructura de protección         |               | Unidad principal: IP65, conector con cable: IP67                                              |                                     |                |
| Indicación de presión            | Precisión     | ±3% (F.S.)                                                                                    |                                     |                |
|                                  | Unidad mínima | MPa: 0.01, kgf/cm <sup>2</sup> : 0.01, bar: 0.01, PSI: 0.1 (nota 1), kPa: 1                   |                                     |                |
| Temperatura ambiente y de fluido |               | 0-50 °C (sin condensación)                                                                    |                                     |                |

(Nota 1) 1 PSI es la unidad mínima de ITV2050

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.

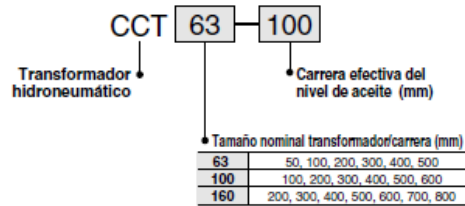


# Transformador hidroneumático

## Serie CCT



### Forma de uso



### Características técnicas

|                                  |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Presión de trabajo               | 0 a 0.7MPa                      |
| Presión de prueba                | 1.05MPa                         |
| Temperatura ambiente y de fluido | 5 a 50°C                        |
| Fluido                           | Aceite de turbina (40 a 100cSt) |

### Carrera efectiva del nivel de aceite estándar transformador/volumen efectivo (cm³)

| a nominal (mm) | Carrera efectiva del nivel de aceite estándar (mm) |     |      |      |      |      |       |       |       | Caudal limitado* (l/min) |
|----------------|----------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------------------------|
|                | 50                                                 | 100 | 200  | 300  | 400  | 500  | 600   | 700   | 800   |                          |
| 63             | 150                                                | 300 | 600  | 890  | 1190 | 1480 | —     | —     | —     | 36                       |
| 100            | —                                                  | 750 | 1510 | 2260 | 3010 | 3770 | 4520  | —     | —     | 88                       |
| 160            | —                                                  | —   | 3660 | 5490 | 7320 | 9150 | 10980 | 12810 | 14640 | 217                      |

\*El flujo limitado muestra el límite de la velocidad de variación del nivel de aceite del transformador (0.2m/s) que puede mantener la estabilidad del nivel de aceite del transformador.

### CCT40-Carrera nivel aceite efectivo

Puesto que el modelo CCT40 es un transformador para actuadores con pequeña capacidad, no puede ser instalado en una unidad hidroneumática. Use, en su lugar, una unidad de válvula individual CC o un regulador de caudal (AS2000, AS3000, AS4000, etc.) por medio de una tubería de conexión.



### Características técnicas

|                                  |                                 |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Presión de trabajo               | 0 a 0.7MPa                      |
| Presión de prueba                | 1.05MPa                         |
| Temperatura ambiente y de fluido | 5 a 50°C                        |
| Fluido                           | Aceite de turbina (40 a 100cSt) |
| Tamaño nominal                   | 40mm                            |

### Carrera efectiva del nivel de aceite estándar /volumen efectivo del transformador

|                                                |    |     |     |     |     |
|------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| Carrera nivel de aceite efectivo estándar (mm) | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 |
| Volumen efectivo (cm³)                         | 60 | 120 | 180 | 250 | 370 |
| Flujo limitado (l/min)                         | 15 |     |     |     |     |

\*El caudal limitado muestra el límite de la velocidad del nivel de aceite del transformador (0.2m/s) que puede mantener



| Modelo   | a conexión aire<br>Rc (PT) | a conexión aceite<br>Rc (PT) | A     | B   | C   | DA  | DB  | DL | H  | NL | P | QB  | QL | S | T  | W   |
|----------|----------------------------|------------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|---|-----|----|---|----|-----|
| CCT63-□  | 3/8                        | 3/4                          | 104   | 88  | 64  | 86  | 88  | 53 | 45 | 28 | 3 | 86  | 30 | 0 | 11 | 9.5 |
| CCT100-□ | 1/2                        | 1                            | 139   | 125 | 92  | 116 | 123 | 61 | 65 | 33 | 5 | 120 | 32 | 2 | 13 | 7   |
| CCT160-□ | 3/4                        | 1 1/4                        | 202.5 | 185 | 144 | 180 | 183 | 60 | 93 | 29 | 0 | 185 | 46 | 2 | 20 | 7   |

### Dimensión L

| Carrera efectiva del nivel de aceite (mm) | 50    | 100   | 200   | 300   | 400   | 500   | 600 | 700 | 800  |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|------|
| CCT63-□                                   | 228.5 | 278.5 | 378.5 | 503.5 | 603.5 | 728.5 | —   | —   | —    |
| CCT100-□                                  | —     | 286   | 386   | 511   | 611   | 736   | 836 | —   | —    |
| CCT160-□                                  | —     | —     | 399   | 524   | 624   | 749   | 849 | 949 | 1049 |

\* Se usa un tornillo Allen para el montaje.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



# ANEXO III: CALIBRACIÓN DEL BANCO DE ENSAYO

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para  
Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



### ANEXO III: CALIBRACIÓN DEL BANCO DE ENSAYO

Como ya se ha mencionado en el apartado 4.1.6.1., realizaremos tanto el calibrado del modo de precarga, con el objetivo de poder emplear el banco en modo de carga estática, como del modo de ciclo de carga, para el empleo del banco en modo de carga dinámica, lo cuál es el objetivo fundamental de este TFG.

En las calibraciones del modo de carga estático y el modo de carga dinámico el objetivo es encontrar una función de la forma  $V(x_1, x_2, \dots)$  que nos permita conocer el voltaje (V) a suministrar en función del parámetro o combinación de parámetros  $(x_1, x_2, \dots)$  que busquemos.

#### III.1. Calibración de la célula de carga

La calibración de la célula de carga se basa simplemente en comprobar que las medidas que realizamos con ella, una vez aplicadas fórmulas teóricas, se asemejan lo máximo posible a las determinadas por el software de la tarjeta Labjack, basándonos en la correcta calibración previa realizada por el diseñador original del banco de ensayo.

Las fórmulas teóricas son las siguientes:

- 1) Asumimos una relación de 1.2 bar/V para la electroválvula proporcional.
- 2) Multiplicamos por 10 esta presión al pasar por el multiplicador hidroneumático.
- 3) Multiplicamos esta presión por 0.1348 kN/bar, relación obtenida a partir de la geometría del cilindro.

La lectura que realiza Arduino de la tensión proporcionada por el acondicionador de la célula de carga se encuentra en el rango 0-1023 por ser una



señal analógica, por lo que debemos normalizarla a 0-5 V y multiplicarla por la ganancia correspondiente al fondo de escala seleccionado en la centralita hidráulica.

Hay que tener en cuenta que la tarjeta Arduino tiene un máximo de 5 V como capacidad de tratamiento de señales, mientras que este máximo en la tarjeta Labjack se encuentra en 10 V. Por lo tanto Arduino está limitada a leer como máximo la mitad del fondo de escala de la tarjeta Labjack. Es decir, nuestro fondo de escala real será la mitad del indicado en la centralita (Tabla 6).

| F.E. Labjack (kN) | F.E. Arduino (kN) | Ganancia (kN/V) |
|-------------------|-------------------|-----------------|
| 15                | 7.5               | 1.5347          |
| 10                | 5                 | 1.0589          |
| 7.5               | 3.75              | 0.8213          |
| 5                 | 2.5               | 0.5246          |
| 2.5               | 1.25              | 0.2632          |

Tabla 6: Fondos de escala para ambas tarjetas y ganancias equivalentes

### III.2. Calibración de la electroválvula proporcional

Primero comenzaremos calibrando la presión que obtenemos de la electroválvula proporcional ante una señal constante. Recordamos que el rango de presión que vamos a obtener debido a los parámetros de funcionamiento del sistema es de 0-6 bar, por lo tanto, podríamos suponer que, dado que el rango de tensión aplicado es 0-5 V, tendríamos una relación de 1.2 bar/V, sin embargo, experimentalmente comprobamos que esto no es así, debido a pérdidas por resistencias eléctricas del sistema.

El proceso seguido ha sido el siguiente:

- a) Establecemos una serie de valores de voltaje que aplicaremos como si de una precarga se tratase. Para el caso que se nos ocupa hemos seleccionado el rango de valores 0-5 V, con incrementos de 0.2 V.

*Trabajo Fin de Grado: Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





- b) Se aplican los valores determinados y se recoge la información obtenida visualizando el display de la electroválvula proporcional (Tabla 7).

| V   | bar  |
|-----|------|
| 0   | 0,03 |
| 0,2 | 0,31 |
| 0,4 | 0,6  |
| 0,6 | 0,87 |
| 0,8 | 1,12 |
| 1   | 1,37 |
| 1,2 | 1,61 |
| 1,4 | 1,83 |
| 1,6 | 2,07 |
| 1,8 | 2,3  |
| 2   | 2,5  |
| 2,2 | 2,72 |
| 2,4 | 2,92 |
| 2,6 | 3,16 |
| 2,8 | 3,35 |
| 3   | 3,57 |
| 3,2 | 3,75 |
| 3,4 | 3,98 |
| 3,6 | 4,2  |
| 3,8 | 4,4  |
| 4   | 4,6  |
| 4,2 | 4,82 |
| 4,4 | 5,05 |
| 4,6 | 5,3  |
| 4,8 | 5,52 |
| 5   | 5,83 |

Tabla 7: Relación voltaje-presión del ITV

- c) Representamos los datos gráficamente (fig. 80) y obtenemos una regresión lineal para los mismos (9).



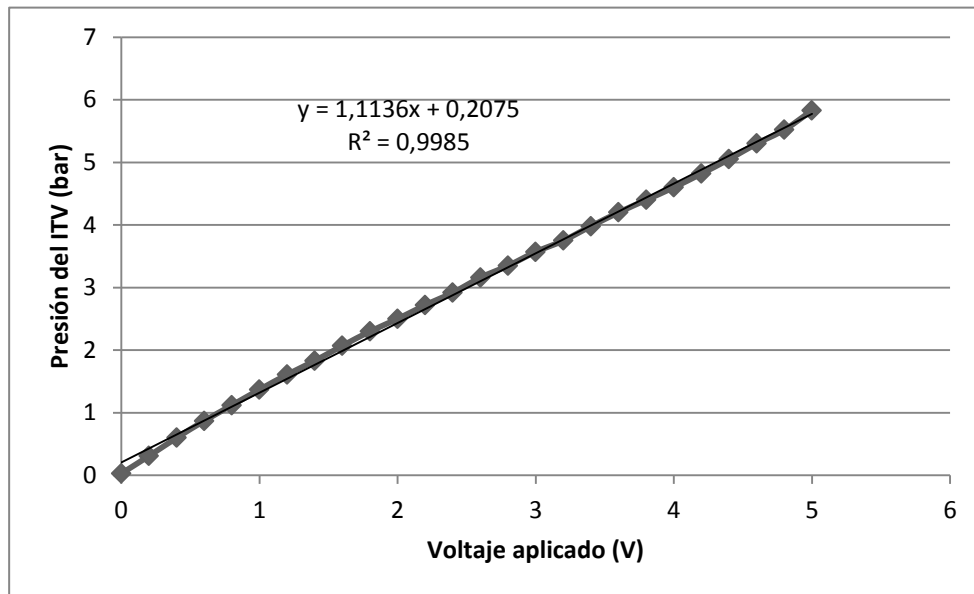


Figura 80: Gráfico de ajuste de la electroválvula proporcional

Por lo tanto, obtenemos que la función de presión calibrada emitida por la electroválvula proporcional en función del voltaje aplicado es:

$$P(V) = 1.1136 \cdot V + 0.2075 \text{ (bar)} \quad (9)$$

### III.3. Calibración de modo estático

Se hace necesaria la calibración del modo de precarga del banco de ensayos por los motivos anteriormente mencionados. El proceso seguido será el siguiente:

- a) Determinamos una serie de valores de voltaje que aplicaremos al sistema.
- b) Se aplican los valores determinados y se recoge la información obtenida por la célula de carga. A partir de la función de la presión de la electroválvula proporcional y la geometría del cilindro podemos calcular aproximadamente cual será la carga que obtendremos, dato empleado para el ajuste del fondo de escala, aplicando la siguiente expresión:

$$F(V) = 1.5011 \cdot V + 0.2797 \text{ (kN)} \quad (10)$$

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



- c) Repetido este proceso 5 veces podemos promediar los valores obtenidos (Tabla 8) y representar gráficamente (fig. 81), así como obtener la regresión lineal (11) que nos permitirá obtener la función de precarga calibrada.

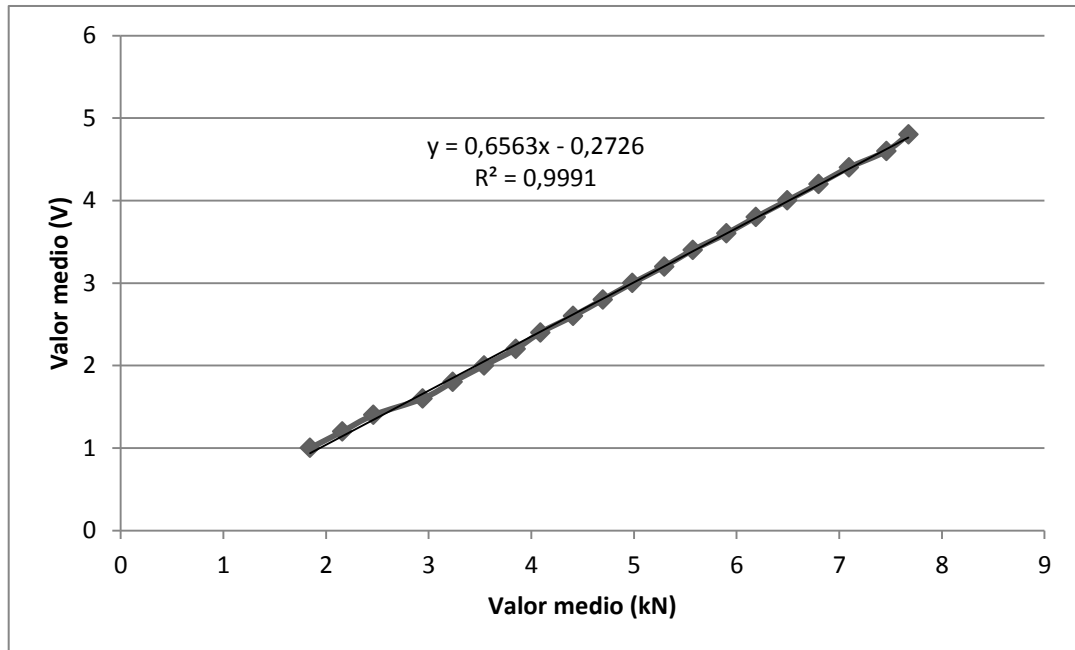


Figura 81: Gráfico de ajuste de modo de carga estático



| Voltaje de entrada (V) | Carga esperada (kN) | F.E. (kN) | Carga de salida (kN) |               |               |               |               | Valores promedio (kN) |
|------------------------|---------------------|-----------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|
|                        |                     |           | Valor medio 1        | Valor medio 2 | Valor medio 3 | Valor medio 4 | Valor medio 5 |                       |
| 1                      | 1,7808428           | 2,5       | 1,8461               | 1,83072       | 1,84995       | 1,84738       | 1,84995       | 1,84482               |
| 1,2                    | 2,08106936          | 2,5       | 2,15507              | 2,16917       | 2,15378       | 2,15378       | 2,15378       | 2,157116              |
| 1,4                    | 2,38129592          | 2,5       | 2,46018              | 2,46531       | 2,45377       | 2,47429       | 2,45634       | 2,461978              |
| 1,6                    | 2,68152248          | 3,75      | 2,94239              | 2,95445       | 2,93035       | 2,94038       | 2,93637       | 2,940788              |
| 1,8                    | 2,98174904          | 3,75      | 3,23342              | 3,26352       | 3,2294        | 3,22137       | 3,22539       | 3,23462               |
| 2                      | 3,2819756           | 3,75      | 3,54652              | 3,53849       | 3,54251       | 3,54652       | 3,52444       | 3,539696              |
| 2,2                    | 3,58220216          | 3,75      | 3,84959              | 3,85631       | 3,85561       | 3,84558       | 3,83755       | 3,848928              |
| 2,4                    | 3,88242872          | 5         | 4,09638              | 4,08603       | 4,0912        | 4,08603       | 4,08085       | 4,088098              |
| 2,6                    | 4,18265528          | 5         | 4,40691              | 4,4095        | 4,41208       | 4,40691       | 4,40432       | 4,407944              |
| 2,8                    | 4,48288184          | 5         | 4,69632              | 4,6897        | 4,70708       | 4,68638       | 4,70708       | 4,697312              |
| 3                      | 4,7831084           | 5         | 4,97621              | 4,97621       | 5,00467       | 4,98138       | 4,98138       | 4,98397               |
| 3,2                    | 5,08333496          | 7,5       | 5,29944              | 5,30694       | 5,31444       | 5,31069       | 5,23943       | 5,294188              |
| 3,4                    | 5,38356152          | 7,5       | 5,58073              | 5,57698       | 5,58823       | 5,61073       | 5,51322       | 5,573978              |
| 3,6                    | 5,68378808          | 7,5       | 5,91077              | 5,92577       | 5,92952       | 5,89952       | 5,83576       | 5,900268              |
| 3,8                    | 5,98401464          | 7,5       | 6,16955              | 6,20331       | 6,21831       | 6,20706       | 6,1433        | 6,188306              |
| 4                      | 6,2842412           | 7,5       | 6,5071               | 6,5446        | 6,50335       | 6,47709       | 6,43584       | 6,493596              |
| 4,2                    | 6,58446776          | 7,5       | 6,79589              | 6,81464       | 6,84089       | 6,77338       | 6,76213       | 6,797386              |
| 4,4                    | 6,88469432          | 7,5       | 7,09592              | 7,11468       | 7,14093       | 7,07342       | 7,04717       | 7,094424              |
| 4,6                    | 7,18492088          | 7,5       | 7,42972              | 7,49348       | 7,49723       | 7,44847       | 7,42597       | 7,458974              |
| 4,8                    | 7,48514744          | 7,5       | 7,6735               | 7,6735        | 7,6735        | 7,6735        | 7,6735        | 7,6735                |

Tabla 8: Toma de datos para calibración de modo de carga estático

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas*

*Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



Finalmente obtenemos la siguiente función experimental para el voltaje a aplicar sobre la electroválvula proporcional en función de la fuerza requerida:

$$V(F) = 0.6563 \cdot F - 0.2726 \text{ (V)} \quad (11)$$

### III.4. Calibración de modo dinámico

El proceso a seguir, mucho más complejo en este caso, es el siguiente:

- Se tomarán medidas tanto a valor medio de entrada constante, como de amplitud constante.
- Por problemas de caudal emplearemos tres frecuencias distintas: 0.2, 0.5 y 1 Hz.
- En función de la magnitud constante la magnitud restante variará entre unos determinados parámetros:
  - Amplitud constante: el valor medio mínimo aplicado será igual a la amplitud aplicada para no obtener valores negativos. A partir de ahí, aplicamos valores iguales al 120, 140, 160, 180 y 200 % del valor de la amplitud. Los valores de amplitud serán 1, 1.5 y 2 V.
  - Valor medio contante: el valor máximo de la amplitud aplicada será igual al del valor medio para evitar valores negativos. Desde el inicio hasta ese máximo aplicaremos valores de amplitud iguales al 20, 40, 60 y 80 % del valor medio. Los valores de valor medio aplicados serán 1.5, 2, 2.5 y 3 V.
- Todas las mediciones se realizarán un total de cinco veces (Tabla 9).



| Voltaje de entrada (V) |                  |            | Vmax<br>(V) | Carga max<br>calculada<br>(kN) | F.E.<br>(kN) | Carga de salida (kN) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|------------------|------------|-------------|--------------------------------|--------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valor<br>medio<br>(Vm) | Amplitud<br>(Am) | Frecuencia |             |                                |              | Vm 1                 | Am 1  | Vm 2  | Am 2  | Vm 3  | Am 3  | Vm 4  | Am 4  | Vm 5  | Am 5  |
| 1                      | 1                | 0,2        | 2           | 3,282                          | 3,75         | 1,806                | 1,646 | 1,832 | 1,628 | 1,851 | 1,630 | 1,843 | 1,614 | 1,836 | 1,606 |
| 1                      | 1                | 0,5        | 2           | 3,282                          | 3,75         | 1,843                | 1,576 | 1,883 | 1,586 | 1,875 | 1,580 | 1,881 | 1,574 | 1,865 | 1,572 |
| 1                      | 1                | 1          | 2           | 3,282                          | 3,75         | 1,959                | 1,285 | 1,973 | 1,303 | 1,979 | 1,313 | 1,955 | 1,297 | 1,973 | 1,299 |
| 1,2                    | 1                | 0,2        | 2,2         | 3,582                          | 3,75         | 1,961                | 1,750 | 2,023 | 1,774 | 1,997 | 1,740 | 1,999 | 1,756 | 2,003 | 1,752 |
| 1,2                    | 1                | 0,5        | 2,2         | 3,582                          | 3,75         | 2,067                | 1,646 | 2,091 | 1,662 | 2,095 | 1,686 | 2,075 | 1,664 | 2,085 | 1,684 |
| 1,2                    | 1                | 1          | 2,2         | 3,582                          | 3,75         | 2,449                | 1,126 | 2,505 | 1,180 | 2,425 | 1,128 | 2,447 | 1,146 | 2,433 | 1,144 |
| 1,4                    | 1                | 0,2        | 2,4         | 3,882                          | 5,00         | 2,526                | 1,403 | 2,513 | 1,452 | 2,489 | 1,408 | 2,456 | 1,421 | 2,621 | 1,470 |
| 1,4                    | 1                | 0,5        | 2,4         | 3,882                          | 5,00         | 2,554                | 1,348 | 2,539 | 1,405 | 2,513 | 1,359 | 2,443 | 1,392 | 2,663 | 1,444 |
| 1,4                    | 1                | 1          | 2,4         | 3,882                          | 5,00         | 2,668                | 1,074 | 2,660 | 1,167 | 2,619 | 1,102 | 2,489 | 1,077 | 2,766 | 1,208 |
| 1,6                    | 1                | 0,2        | 2,6         | 4,183                          | 5,00         | 2,922                | 1,302 | 2,896 | 1,351 | 2,865 | 1,312 | 3,020 | 1,348 | 3,002 | 1,397 |
| 1,6                    | 1                | 0,5        | 2,6         | 4,183                          | 5,00         | 2,911                | 1,271 | 2,893 | 1,325 | 2,896 | 1,271 | 3,046 | 1,312 | 3,030 | 1,397 |
| 1,6                    | 1                | 1          | 2,6         | 4,183                          | 5,00         | 3,004                | 1,048 | 2,991 | 1,128 | 2,945 | 1,082 | 3,116 | 1,082 | 3,100 | 1,190 |
| 1,8                    | 1                | 0,2        | 2,8         | 4,483                          | 5,00         | 3,240                | 1,247 | 3,219 | 1,328 | 3,209 | 1,227 | 3,351 | 1,286 | 3,346 | 1,338 |
| 1,8                    | 1                | 0,5        | 2,8         | 4,483                          | 5,00         | 3,266                | 1,188 | 3,224 | 1,291 | 3,219 | 1,188 | 3,382 | 1,221 | 3,367 | 1,302 |
| 1,8                    | 1                | 1          | 2,8         | 4,483                          | 5,00         | 3,302                | 0,996 | 3,276 | 1,144 | 3,289 | 0,996 | 3,405 | 1,025 | 3,426 | 1,126 |
| 2                      | 1                | 0,2        | 3           | 4,783                          | 5,00         | 3,574                | 1,193 | 3,532 | 1,240 | 3,522 | 1,164 | 3,693 | 1,224 | 3,695 | 1,284 |
| 2                      | 1                | 0,5        | 3           | 4,783                          | 5,00         | 3,589                | 1,136 | 3,566 | 1,221 | 3,548 | 1,120 | 3,693 | 1,162 | 3,700 | 1,221 |
| 2                      | 1                | 1          | 3           | 4,783                          | 5,00         | 3,568                | 1,022 | 3,566 | 1,007 | 3,594 | 0,945 | 3,724 | 1,001 | 3,721 | 1,051 |
| 1,5                    | 1,5              | 0,2        | 3           | 4,783                          | 5,00         | 2,473                | 2,394 | 2,510 | 2,381 | 2,518 | 2,378 | 2,681 | 2,357 | 2,668 | 2,383 |
| 1,5                    | 1,5              | 0,5        | 3           | 4,783                          | 5,00         | 2,500                | 2,293 | 2,580 | 2,280 | 2,567 | 2,277 | 2,725 | 2,282 | 2,730 | 2,306 |
| 1,5                    | 1,5              | 1          | 3           | 4,783                          | 5,00         | 2,655                | 1,832 | 2,815 | 1,853 | 2,740 | 1,907 | 2,909 | 1,874 | 2,903 | 1,837 |

Trabajo Fin de Grado: Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de

Carga Biaxial.

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



|     |     |     |     |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-----|-----|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,8 | 1,5 | 0,2 | 3,3 | 5,233 | 7,50 | 2,757 | 2,427 | 2,895 | 2,603 | 2,974 | 2,460 | 2,993 | 2,472 | 2,967 | 2,539 |
| 1,8 | 1,5 | 0,5 | 3,3 | 5,233 | 7,50 | 3,075 | 2,112 | 3,278 | 2,153 | 3,304 | 2,089 | 3,312 | 2,172 | 3,293 | 2,160 |
| 1,8 | 1,5 | 1   | 3,3 | 5,233 | 7,50 | 3,214 | 1,669 | 3,454 | 1,759 | 3,484 | 1,751 | 3,492 | 1,830 | 3,469 | 1,811 |
| 2,1 | 1,5 | 0,2 | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 3,537 | 2,104 | 3,728 | 2,123 | 3,758 | 2,063 | 3,758 | 2,115 | 3,765 | 2,138 |
| 2,1 | 1,5 | 0,5 | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 3,574 | 2,022 | 3,772 | 2,063 | 3,803 | 2,010 | 3,788 | 2,085 | 3,799 | 2,097 |
| 2,1 | 1,5 | 1   | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 3,657 | 1,684 | 3,844 | 1,729 | 3,919 | 1,703 | 3,934 | 1,781 | 3,871 | 1,781 |
| 2,4 | 1,5 | 0,2 | 3,9 | 6,134 | 7,50 | 4,028 | 2,025 | 4,238 | 2,033 | 4,246 | 1,954 | 4,242 | 2,048 | 4,261 | 2,048 |
| 2,4 | 1,5 | 0,5 | 3,9 | 6,134 | 7,50 | 4,043 | 1,958 | 4,272 | 1,999 | 4,287 | 1,917 | 4,276 | 1,995 | 4,279 | 2,014 |
| 2,4 | 1,5 | 1   | 3,9 | 6,134 | 7,50 | 4,133 | 1,721 | 4,324 | 1,736 | 4,366 | 1,680 | 4,354 | 1,781 | 4,332 | 1,714 |
| 2,7 | 1,5 | 0,2 | 4,2 | 6,584 | 7,50 | 4,542 | 1,962 | 4,771 | 1,950 | 4,786 | 1,887 | 4,767 | 1,973 | 4,759 | 1,977 |
| 2,7 | 1,5 | 0,5 | 4,2 | 6,584 | 7,50 | 4,564 | 1,909 | 4,774 | 1,902 | 4,827 | 1,853 | 4,812 | 1,932 | 4,797 | 1,920 |
| 2,7 | 1,5 | 1   | 4,2 | 6,584 | 7,50 | 4,594 | 1,676 | 4,819 | 1,673 | 4,883 | 1,620 | 4,823 | 1,714 | 4,793 | 1,695 |
| 3   | 1,5 | 0,2 | 4,5 | 7,035 | 7,50 | 5,026 | 1,913 | 5,258 | 1,913 | 5,288 | 1,845 | 5,277 | 1,909 | 5,262 | 1,924 |
| 3   | 1,5 | 0,5 | 4,5 | 7,035 | 7,50 | 5,041 | 1,860 | 5,266 | 1,853 | 5,307 | 1,770 | 5,299 | 1,875 | 5,284 | 1,894 |
| 3   | 1,5 | 1   | 4,5 | 7,035 | 7,50 | 5,033 | 1,620 | 5,296 | 1,620 | 5,318 | 1,549 | 5,299 | 1,624 | 5,213 | 1,586 |
| 2   | 2   | 0,2 | 4   | 6,284 | 7,50 | 3,143 | 3,113 | 3,420 | 3,188 | 3,387 | 3,139 | 3,383 | 3,150 | 3,372 | 3,154 |
| 2   | 2   | 0,5 | 4   | 6,284 | 7,50 | 3,293 | 2,993 | 3,518 | 3,049 | 3,522 | 2,982 | 3,518 | 3,023 | 3,499 | 3,023 |
| 2   | 2   | 1   | 4   | 6,284 | 7,50 | 3,507 | 2,355 | 3,799 | 2,412 | 3,792 | 2,348 | 3,720 | 2,333 | 3,664 | 2,299 |
| 2,4 | 2   | 0,2 | 4,4 | 6,885 | 7,50 | 3,908 | 2,955 | 4,152 | 2,997 | 4,186 | 2,910 | 4,171 | 2,918 | 4,144 | 2,937 |
| 2,4 | 2   | 0,5 | 4,4 | 6,885 | 7,50 | 4,013 | 2,880 | 4,283 | 2,888 | 4,313 | 2,835 | 4,272 | 2,843 | 4,249 | 2,847 |
| 2,4 | 2   | 1   | 4,4 | 6,885 | 7,50 | 4,159 | 2,243 | 4,456 | 2,322 | 4,418 | 2,243 | 4,328 | 2,213 | 4,332 | 2,209 |
| 2,8 | 2   | 0,2 | 4,8 | 7,485 | 7,50 | 4,662 | 2,820 | 4,857 | 2,817 | 4,909 | 2,753 | 4,894 | 2,779 | 4,876 | 2,787 |
| 2,8 | 2   | 0,5 | 4,8 | 7,485 | 7,50 | 4,722 | 2,820 | 4,924 | 2,745 | 4,969 | 2,704 | 4,943 | 2,745 | 4,932 | 2,742 |
| 2,8 | 2   | 1   | 4,8 | 7,485 | 7,50 | 4,684 | 2,187 | 4,962 | 2,280 | 4,943 | 2,175 | 4,831 | 2,037 | 4,943 | 2,209 |
| 1,5 | 0,3 | 0,2 | 1,8 | 2,982 | 3,75 | 2,639 | 0,233 | 2,880 | 0,229 | 2,812 | 0,223 | 2,926 | 0,245 | 2,906 | 0,199 |
| 1,5 | 0,3 | 0,5 | 1,8 | 2,982 | 3,75 | 2,645 | 0,219 | 2,898 | 0,207 | 2,818 | 0,209 | 2,942 | 0,221 | 2,940 | 0,191 |
| 1,5 | 0,3 | 1   | 1,8 | 2,982 | 3,75 | 2,657 | 0,191 | 2,906 | 0,177 | 2,946 | 0,181 | 2,932 | 0,197 | 2,932 | 0,171 |

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



|     |     |     |     |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-----|-----|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,5 | 0,6 | 0,2 | 2,1 | 3,432 | 3,75 | 2,934 | 0,698 | 2,880 | 0,684 | 2,910 | 0,715 | 2,908 | 0,702 | 2,900 | 0,646 |
| 1,5 | 0,6 | 0,5 | 2,1 | 3,432 | 3,75 | 2,946 | 0,658 | 2,902 | 0,642 | 2,922 | 0,662 | 2,916 | 0,676 | 2,898 | 0,622 |
| 1,5 | 0,6 | 1   | 2,1 | 3,432 | 3,75 | 2,985 | 0,548 | 2,912 | 0,532 | 2,930 | 0,562 | 2,942 | 0,562 | 2,924 | 0,522 |
| 1,5 | 0,9 | 0,2 | 2,4 | 3,882 | 5,00 | 2,844 | 1,162 | 2,870 | 1,291 | 2,872 | 1,299 | 2,867 | 1,291 | 2,865 | 1,281 |
| 1,5 | 0,9 | 0,5 | 2,4 | 3,882 | 5,00 | 2,844 | 1,105 | 2,909 | 1,263 | 2,898 | 1,284 | 2,898 | 1,276 | 2,880 | 1,271 |
| 1,5 | 0,9 | 1   | 2,4 | 3,882 | 5,00 | 2,883 | 0,875 | 2,942 | 1,110 | 2,966 | 1,113 | 2,929 | 1,089 | 2,955 | 1,118 |
| 1,5 | 1,2 | 0,2 | 2,7 | 4,333 | 5,00 | 2,777 | 1,685 | 2,520 | 2,070 | 2,544 | 2,068 | 2,583 | 1,995 | 2,513 | 2,075 |
| 1,5 | 1,2 | 0,5 | 2,7 | 4,333 | 5,00 | 2,810 | 1,628 | 2,844 | 1,736 | 2,847 | 1,734 | 2,849 | 1,747 | 2,800 | 1,713 |
| 1,5 | 1,2 | 1   | 2,7 | 4,333 | 5,00 | 2,981 | 1,264 | 2,991 | 1,400 | 2,984 | 1,452 | 2,989 | 1,418 | 2,971 | 1,408 |
| 1,5 | 1,5 | 0,2 | 3   | 4,783 | 5,00 | 2,621 | 2,409 | 2,671 | 2,386 | 2,665 | 2,404 | 2,663 | 2,404 | 2,650 | 2,407 |
| 1,5 | 1,5 | 0,5 | 3   | 4,783 | 5,00 | 2,689 | 2,293 | 2,720 | 2,316 | 2,730 | 2,329 | 2,730 | 2,321 | 2,717 | 2,316 |
| 1,5 | 1,5 | 1   | 3   | 4,783 | 5,00 | 2,875 | 1,845 | 2,937 | 1,897 | 2,922 | 1,886 | 2,896 | 1,855 | 2,898 | 1,902 |
| 2   | 0,4 | 0,2 | 2,4 | 3,882 | 5,00 | 3,724 | 0,365 | 3,742 | 0,357 | 3,734 | 0,355 | 3,744 | 0,380 | 3,719 | 0,375 |
| 2   | 0,4 | 0,5 | 2,4 | 3,882 | 5,00 | 3,724 | 0,339 | 3,737 | 0,342 | 3,732 | 0,347 | 3,726 | 0,352 | 3,726 | 0,349 |
| 2   | 0,4 | 1   | 2,4 | 3,882 | 5,00 | 3,732 | 0,300 | 3,750 | 0,308 | 3,773 | 0,316 | 3,732 | 0,321 | 3,719 | 0,308 |
| 2   | 0,8 | 0,2 | 2,8 | 4,483 | 5,00 | 3,685 | 0,978 | 3,706 | 0,983 | 3,706 | 0,942 | 3,682 | 0,965 | 3,685 | 0,978 |
| 2   | 0,8 | 0,5 | 2,8 | 4,483 | 5,00 | 3,688 | 0,934 | 3,719 | 0,939 | 3,713 | 0,924 | 3,708 | 0,950 | 3,700 | 0,950 |
| 2   | 0,8 | 1   | 2,8 | 4,483 | 5,00 | 3,724 | 0,810 | 3,742 | 0,787 | 3,711 | 0,779 | 3,724 | 0,810 | 3,688 | 0,825 |
| 2   | 1,2 | 0,2 | 3,2 | 5,083 | 7,50 | 3,619 | 1,586 | 3,660 | 1,605 | 3,675 | 1,650 | 3,649 | 1,676 | 3,634 | 1,658 |
| 2   | 1,2 | 0,5 | 3,2 | 5,083 | 7,50 | 3,642 | 1,556 | 3,683 | 1,583 | 3,690 | 1,624 | 3,675 | 1,628 | 3,675 | 1,650 |
| 2   | 1,2 | 1   | 3,2 | 5,083 | 7,50 | 3,732 | 1,298 | 3,717 | 1,369 | 3,765 | 1,463 | 3,720 | 1,440 | 3,702 | 1,448 |
| 2   | 1,6 | 0,2 | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 3,552 | 2,307 | 3,582 | 2,277 | 3,585 | 2,314 | 3,563 | 2,348 | 3,548 | 2,355 |
| 2   | 1,6 | 0,5 | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 3,600 | 2,232 | 3,657 | 2,224 | 3,649 | 2,284 | 3,627 | 2,277 | 3,604 | 2,337 |
| 2   | 1,6 | 1   | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 3,788 | 1,830 | 3,777 | 1,838 | 3,788 | 1,860 | 3,795 | 1,928 | 3,788 | 1,935 |
| 2   | 2   | 0,2 | 4   | 6,284 | 7,50 | 3,390 | 3,143 | 3,402 | 3,102 | 3,394 | 3,147 | 3,368 | 3,158 | 3,372 | 3,162 |
| 2   | 2   | 0,5 | 4   | 6,284 | 7,50 | 3,525 | 3,008 | 3,525 | 2,974 | 3,503 | 2,985 | 3,492 | 2,997 | 3,492 | 2,996 |
| 2   | 2   | 1   | 4   | 6,284 | 7,50 | 3,739 | 2,363 | 3,765 | 2,265 | 3,702 | 2,322 | 3,799 | 2,374 | 3,694 | 2,430 |

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





|     |     |     |     |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-----|-----|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2,5 | 0,5 | 0,2 | 3   | 4,783 | 5,00 | 4,531 | 0,499 | 4,529 | 0,554 | 4,541 | 0,494 | 4,518 | 0,479 | 4,516 | 0,476 |
| 2,5 | 0,5 | 0,5 | 3   | 4,783 | 5,00 | 4,523 | 0,466 | 4,534 | 0,510 | 4,510 | 0,499 | 4,510 | 0,476 | 4,518 | 0,455 |
| 2,5 | 0,5 | 1   | 3   | 4,783 | 5,00 | 4,516 | 0,406 | 4,510 | 0,479 | 4,516 | 0,458 | 4,516 | 0,422 | 4,503 | 0,430 |
| 2,5 | 1   | 0,2 | 3,5 | 5,534 | 7,50 | 4,489 | 1,196 | 4,531 | 1,223 | 4,527 | 1,249 | 4,486 | 1,294 | 4,489 | 1,309 |
| 2,5 | 1   | 0,5 | 3,5 | 5,534 | 7,50 | 4,508 | 1,084 | 4,518 | 1,211 | 4,538 | 1,253 | 4,508 | 1,260 | 4,504 | 1,279 |
| 2,5 | 1   | 1   | 3,5 | 5,534 | 7,50 | 4,508 | 0,945 | 4,568 | 1,118 | 4,531 | 1,076 | 4,531 | 1,133 | 4,516 | 1,148 |
| 2,5 | 1,5 | 0,2 | 4   | 6,284 | 7,50 | 4,448 | 1,980 | 4,512 | 1,996 | 4,463 | 2,029 | 4,459 | 2,070 | 4,444 | 2,074 |
| 2,5 | 1,5 | 0,5 | 4   | 6,284 | 7,50 | 4,463 | 1,935 | 4,519 | 1,999 | 4,489 | 2,007 | 4,489 | 2,040 | 4,463 | 2,055 |
| 2,5 | 1,5 | 1   | 4   | 6,284 | 7,50 | 4,497 | 1,601 | 4,579 | 1,804 | 4,482 | 1,759 | 4,576 | 1,833 | 4,527 | 1,834 |
| 2,5 | 2   | 0,2 | 4,5 | 7,035 | 7,50 | 4,373 | 2,895 | 4,418 | 2,892 | 4,411 | 2,899 | 4,418 | 2,910 | 4,407 | 2,940 |
| 2,5 | 2   | 0,5 | 4,5 | 7,035 | 7,50 | 4,459 | 2,847 | 4,527 | 2,820 | 4,504 | 2,869 | 4,486 | 2,895 | 4,478 | 2,880 |
| 2,5 | 2   | 1   | 4,5 | 7,035 | 7,50 | 4,474 | 2,127 | 4,591 | 2,288 | 4,572 | 2,322 | 4,583 | 2,378 | 4,557 | 2,363 |
| 3   | 0,6 | 0,2 | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 5,277 | 0,566 | 5,326 | 0,559 | 5,318 | 0,593 | 5,288 | 0,611 | 5,281 | 0,619 |
| 3   | 0,6 | 0,5 | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 5,277 | 0,533 | 5,326 | 0,533 | 5,314 | 0,540 | 5,296 | 0,570 | 5,288 | 0,578 |
| 3   | 0,6 | 1   | 3,6 | 5,684 | 7,50 | 5,281 | 0,484 | 5,314 | 0,499 | 5,311 | 0,503 | 5,307 | 0,521 | 5,281 | 0,518 |
| 3   | 1,2 | 0,2 | 4,2 | 6,584 | 7,50 | 5,258 | 1,433 | 5,326 | 1,421 | 5,296 | 1,433 | 5,281 | 1,470 | 5,269 | 1,466 |
| 3   | 1,2 | 0,5 | 4,2 | 6,584 | 7,50 | 5,277 | 1,376 | 5,299 | 1,388 | 5,292 | 1,395 | 5,307 | 1,433 | 5,277 | 1,451 |
| 3   | 1,2 | 1   | 4,2 | 6,584 | 7,50 | 5,266 | 1,136 | 5,322 | 1,249 | 5,326 | 1,275 | 5,284 | 1,320 | 5,296 | 1,313 |
| 3   | 1,8 | 0,2 | 4,8 | 7,485 | 7,50 | 5,262 | 2,408 | 5,284 | 2,363 | 5,273 | 2,400 | 5,231 | 2,419 | 5,228 | 2,445 |
| 3   | 1,8 | 0,5 | 4,8 | 7,485 | 7,50 | 5,296 | 2,378 | 5,314 | 2,352 | 5,296 | 2,378 | 5,277 | 2,397 | 5,277 | 2,397 |
| 3   | 1,8 | 1   | 4,8 | 7,485 | 7,50 | 5,104 | 1,774 | 5,292 | 2,022 | 5,262 | 2,059 | 5,239 | 2,097 | 5,176 | 2,033 |

Tabla 9: Toma de medidas para calibración de modo de carga dinámico



Una vez tomadas todas las medidas, procedemos a un análisis de las mismas:

- Ordenamos los datos según sean valor medio o amplitud constante y frecuencia.
- Obtenemos los valores medios y desviaciones típicas de las cinco medidas (Tablas 10, 11, 12, 13, 14 y 15).

| Valor medio (V) | Valor medio (kN) | Desviación típica (kN) |
|-----------------|------------------|------------------------|
| 1               | 1,833674         | 0,01551969             |
| 1,2             | 1,996648         | 0,01248511             |
| 1,4             | 2,52097          | 0,02912747             |
| 1,5             | 2,569946         | 0,01324622             |
| 1,6             | 2,940698         | 0,03779512             |
| 1,8             | 3,095048         | 0,25161122             |
| 2               | 3,472046         | 0,03625869             |
| 2,1             | 3,70923          | 0,02836594             |
| 2,4             | 4,157416         | 0,06417701             |
| 2,7             | 4,724864         | 0,03668913             |
| 2,8             | 4,839632         | 0,02799205             |
| 3               | 5,222182         | 0,03153563             |

Tabla 10: Valor medio y desviación típica para 0.2 Hz. Amplitud constante.

| Valor medio (V) | Valor medio (kN) | Desviación típica (kN) |
|-----------------|------------------|------------------------|
| 1               | 1,869            | 0,0055696              |
| 1,2             | 2,082956         | 0,01675654             |
| 1,4             | 2,54219          | 0,03833662             |
| 1,5             | 2,620334         | 0,01171789             |
| 1,6             | 2,955188         | 0,05176283             |
| 1,8             | 3,272            | 0,02768464             |
| 2               | 3,544577         | 0,10553286             |
| 2,1             | 3,74735          | 0,03815577             |
| 2,4             | 4,228677         | 0,00371514             |
| 2,7             | 4,75487          | 0,0303073              |
| 2,8             | 4,898138         | 0,04231711             |
| 3               | 5,239426         | 0,04755911             |

Tabla 11: Valor medio y desviación típica para 0.5 Hz. Amplitud constante.



| Valor medio (V) | Valor medio (kN) | Desviación típica (kN) |
|-----------------|------------------|------------------------|
| 1               | 1,96773          | 0,01017168             |
| 1,2             | 2,451456         | 0,02173863             |
| 1,4             | 2,640522         | 0,05960175             |
| 1,5             | 2,804584         | 0,03061994             |
| 1,6             | 3,03127          | 0,05512733             |
| 1,8             | 3,381213         | 0,05866582             |
| 2               | 3,665605         | 0,04366667             |
| 2,1             | 3,845            | 0,0447226              |
| 2,4             | 4,320197         | 0,02597486             |
| 2,7             | 4,782624         | 0,03512206             |
| 2,8             | 4,872634         | 0,08877561             |
| 3               | 5,231932         | 0,03227916             |

Tabla 12: Valor medio y desviación típica para 1 Hz. Amplitud constante.

| Amplitud media (V) | Amplitud media (kN) | Desviación típica (kN) |
|--------------------|---------------------|------------------------|
| 0,3                | 0,2255968           | 0,017066078            |
| 0,4                | 0,3664228           | 0,01122032             |
| 0,5                | 0,5004674           | 0,031406736            |
| 0,6                | 0,6393859           | 0,070496142            |
| 0,8                | 0,969358            | 0,016725933            |
| 0,9                | 1,264884            | 0,057933945            |
| 1                  | 1,254164            | 0,047260951            |
| 1,2                | 1,686162            | 0,270566543            |
| 1,5                | 2,215882            | 0,263114433            |
| 1,6                | 2,320054            | 0,032110688            |
| 1,8                | 2,407064            | 0,03005102             |
| 2                  | 3,024769            | 0,166013116            |

Tabla 13: Valor medio y desviación típica para 0.2 Hz. Valor medio constante.

| Amplitud media (V) | Amplitud media (kN) | Desviación típica (kN) |
|--------------------|---------------------|------------------------|
| 0,3                | 0,2091284           | 0,011982323            |
| 0,4                | 0,3457212           | 0,005366085            |
| 0,5                | 0,4813182           | 0,022780637            |
| 0,6                | 0,6014375           | 0,071935246            |
| 0,8                | 0,9393468           | 0,010979129            |
| 0,9                | 1,239458            | 0,075748026            |
| 1                  | 1,217408            | 0,078608517            |
| 1,2                | 1,57614             | 0,153947013            |
| 1,5                | 2,161124            | 0,217593727            |
| 1,6                | 2,270546            | 0,045440098            |
| 1,8                | 2,38006             | 0,018485636            |

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



|   |          |             |
|---|----------|-------------|
| 2 | 2,927233 | 0,091724477 |
|---|----------|-------------|

Tabla 14: Valor medio y desviación típica para 0.5 Hz. Valor medio constante.

| Amplitud media (V) | Amplitud media (kN) | Desviación típica (kN) |
|--------------------|---------------------|------------------------|
| 0,3                | 0,1830464           | 0,010563617            |
| 0,4                | 0,3105278           | 0,007975941            |
| 0,5                | 0,4388788           | 0,029138708            |
| 0,6                | 0,5249702           | 0,028502909            |
| 0,8                | 0,802197            | 0,019016001            |
| 0,9                | 1,0609338           | 0,104706852            |
| 1                  | 1,0838946           | 0,08200018             |
| 1,2                | 1,3501              | 0,079551304            |
| 1,5                | 1,8217519           | 0,078330602            |
| 1,6                | 1,878244            | 0,049924018            |
| 1,8                | 1,996758            | 0,127835691            |
| 2                  | 2,323054            | 0,039250083            |

Tabla 15: Valor medio y desviación típica para 1 Hz. Valor medio constante.

- Graficamos cada conjunto de amplitudes y valores constantes a una misma frecuencia, por ejemplo, los datos de valor medio constante correspondientes a 0.2 Hz. Obtenemos de esta forma un total de 6 gráficas, cuyo eje de abscisas corresponde a los valores de entrada y el de ordenadas a la salida.
- Comprobamos que las series de datos se superponen adecuadamente, por lo que procedemos a graficar las series de datos de igual frecuencia en una sola serie, es decir, asumimos que la magnitud constante de salida es independiente de la magnitud de entrada variable. Si bien podría parecer que para frecuencias bajas y amplitud variable (fig. 85 y 86) la superposición no es muy adecuada cabe decir que es suficiente dada la necesidad que tenemos de agilizar los cálculos lo máximo posible.
- Ajustamos linealmente esta nueva serie de datos y mostramos su desviación típica (fig. 82, 83, 84, 85, 86 y 87).



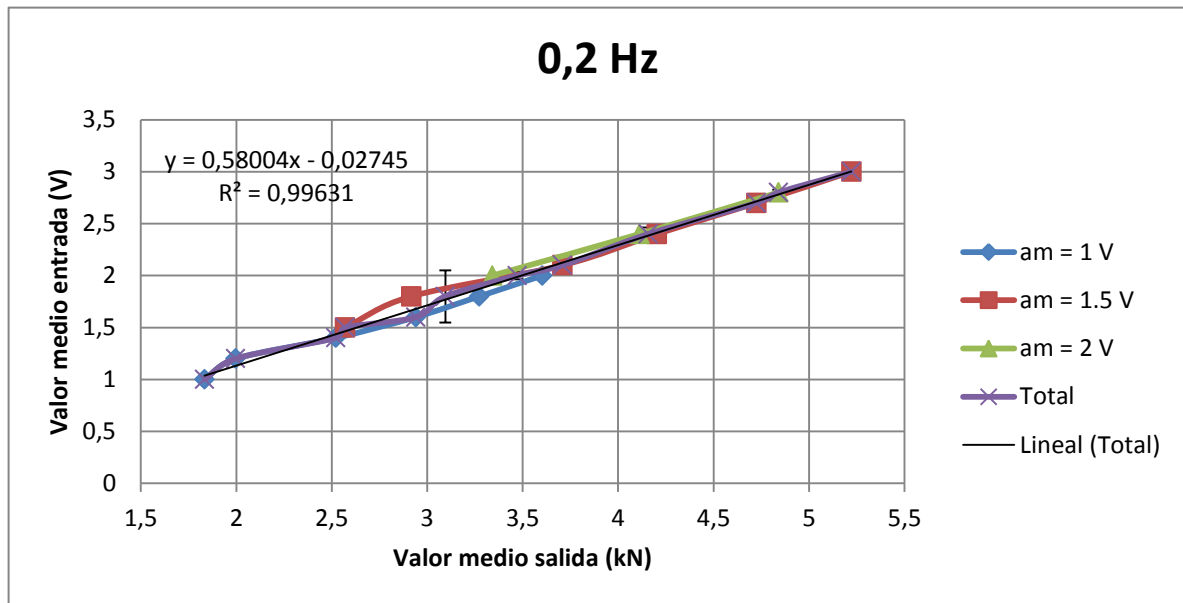


Figura 82: Gráfico V-F para 0.2 Hz y amplitud constante

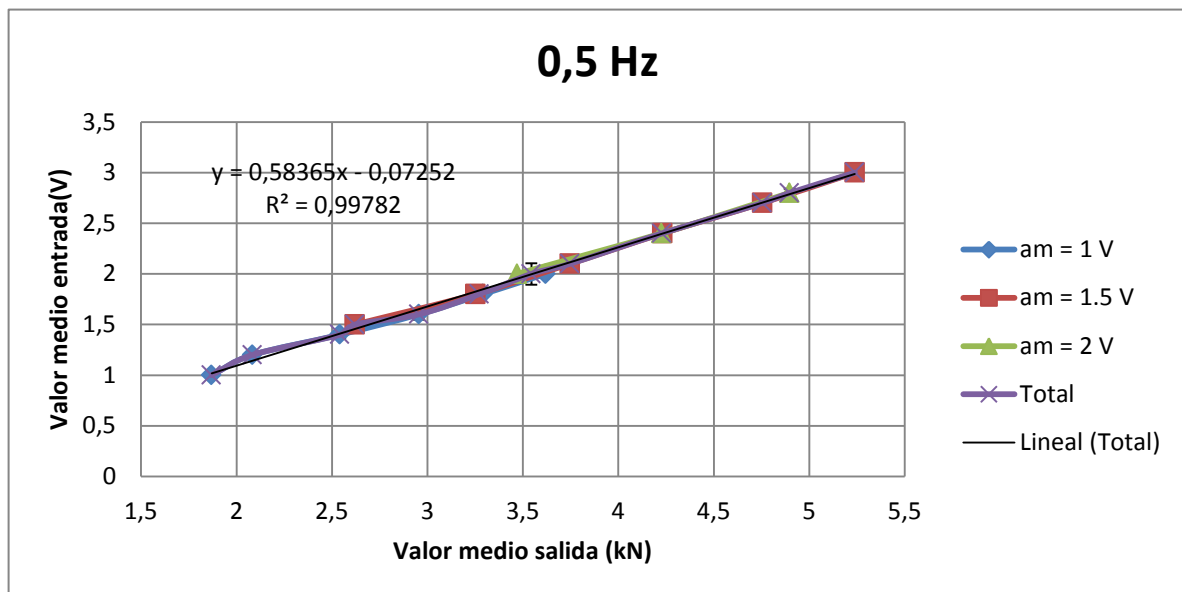


Figura 83: Gráfico V-F para 0.5 Hz y amplitud constante



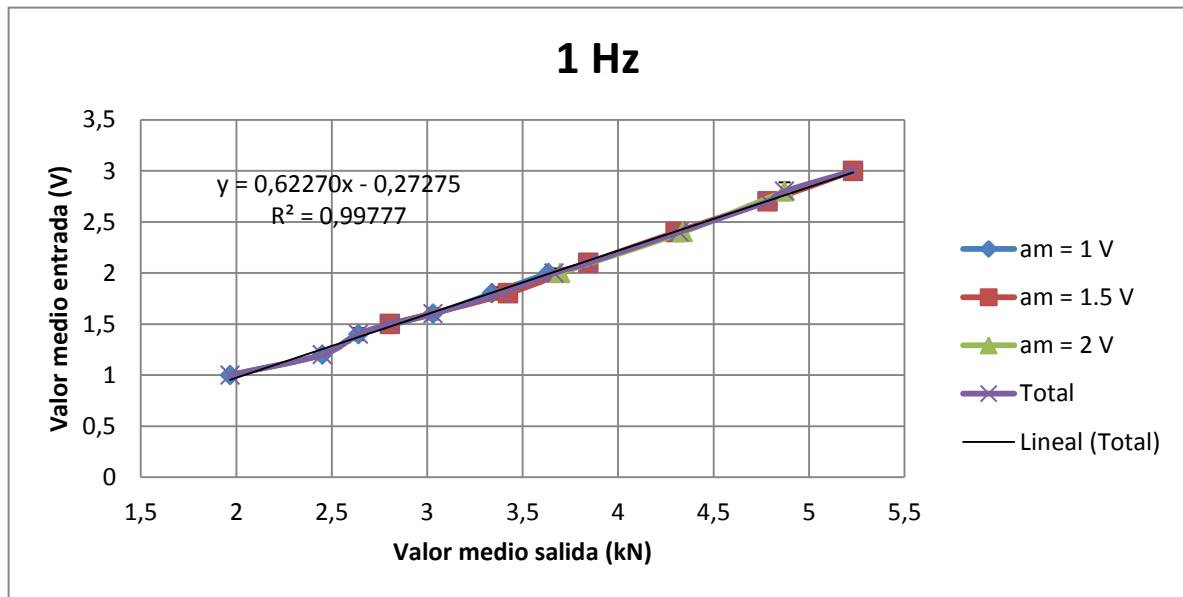


Figura 84: Gráfico V-F para 1 Hz y amplitud constante

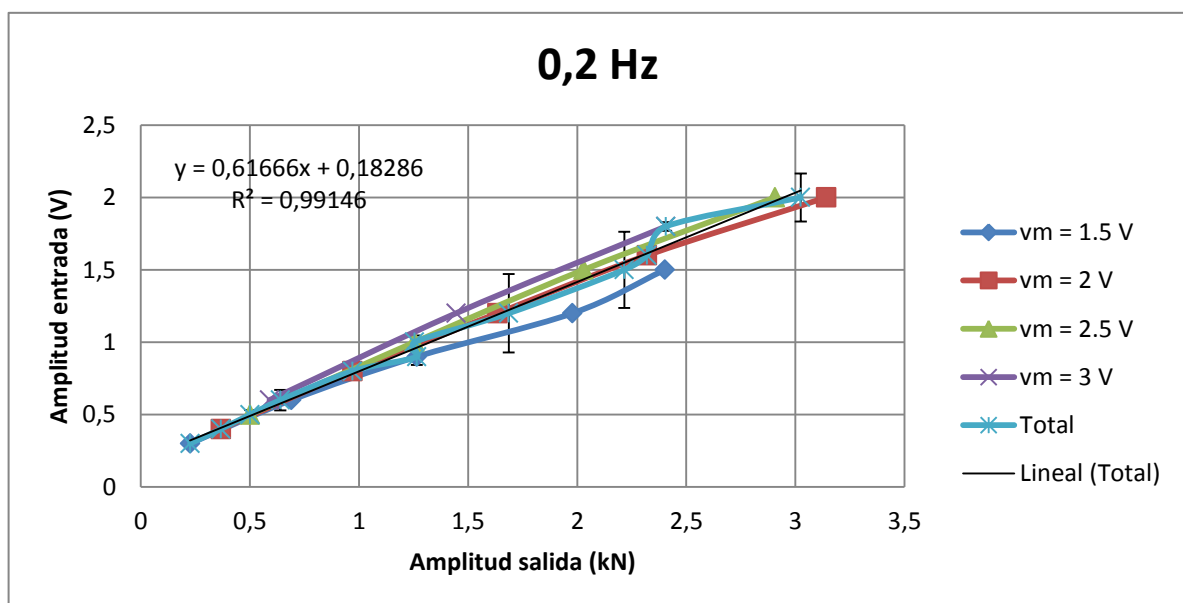


Figura 85: Gráfico V-F para 0.2 Hz y valor medio constante



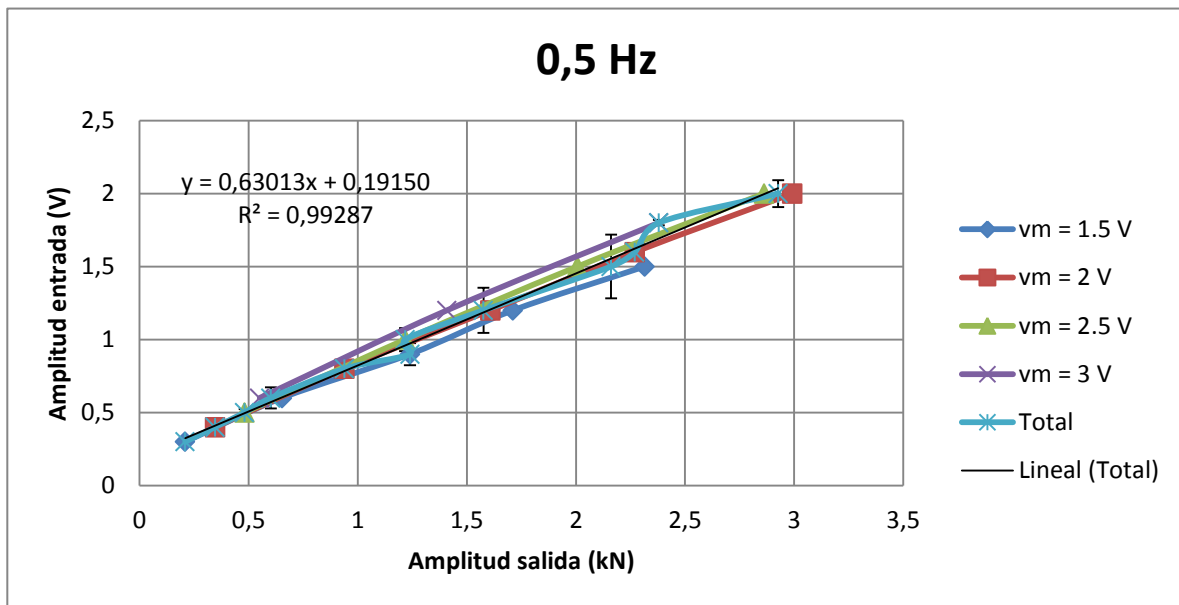


Figura 86: Gráfico V-F para 0.5 Hz y valor medio constante

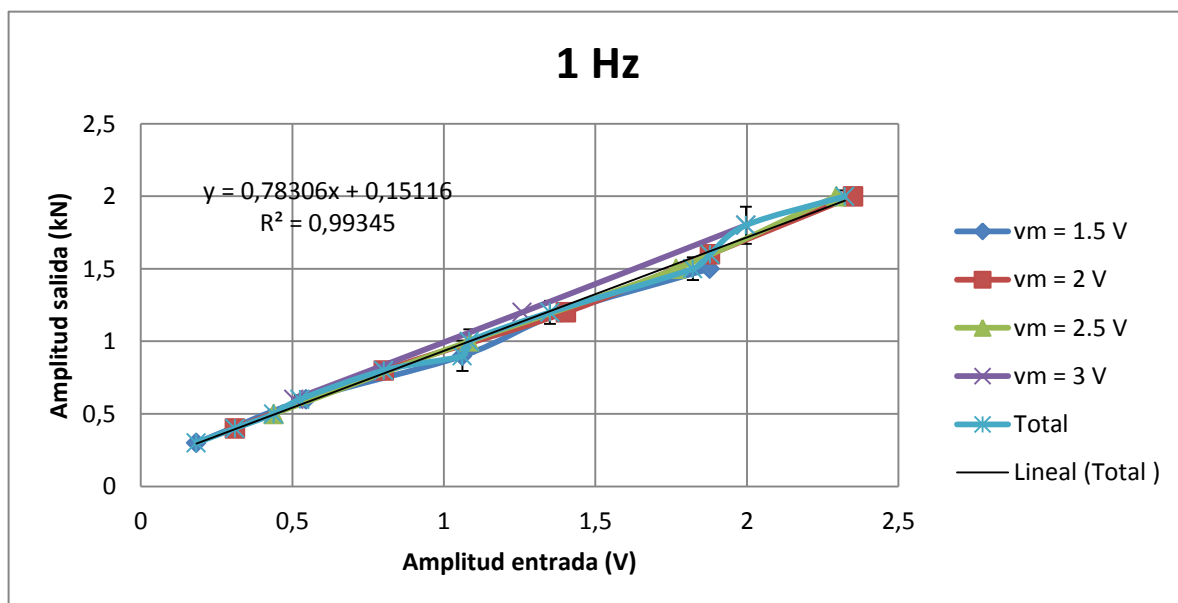


Figura 87: Gráfico V-F para 1 Hz y valor medio constante



A continuación, para unos valores mínimos y máximos de carga tomados en la toma de medidas, obtenemos los valores mínimos y máximos para esos valores correspondientes a los nuevos ajustes lineales, conociendo así los valores extremos en los que podemos hacer funcionar el banco de ensayos (Tablas 16 y 17).

| Frecuencia (Hz) | Valor medio mínimo salida (kN) | Valor medio máximo salida (kN) | Valor medio máximo entrada (V) | Valor medio mínimo entrada (V) |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.2             | 1,4                            | 5,3                            | 0,784606                       | 3,046762                       |
| 0.5             | 1,4                            | 5,3                            | 0,74459                        | 3,020825                       |
| 1               | 1,4                            | 5,3                            | 0,59903                        | 3,02756                        |

Tabla 16: Obtención de valores mínimos y máximos para amplitud constante

| Frecuencia (Hz) | Amplitud mínima salida (kN) | Amplitud máxima salida (kN) | Amplitud máxima entrada (V) | Amplitud mínima entrada (V) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.2             | 0,2                         | 3                           | 0,306192                    | 2,03284                     |
| 0.5             | 0,2                         | 3                           | 0,317526                    | 2,08189                     |
| 1               | 0,2                         | 3                           | 0,307772                    | 2,50034                     |

Tabla 17: Obtención de valores mínimos y máximos para valor medio constante

Conocidos estos datos pasamos a calcular dos ecuaciones de superficie mediante la técnica de coeficientes indeterminados empleando el software Mathematica 8 (fig. 88).

```
Vmin[Vmout_, fr_] := a + b * Vmout + c * fr + d * fr^2 + e * Vmout * fr + f * Vmout * fr^2
Solve[{Vmin[1.4, 0.2] == 0.784606, Vmin[5.3, 0.2] == 3.046762, Vmin[1.4, 0.5] == 0.74459, Vmin[5.3, 0.5] == 3.020825,
  Vmin[1.4, 1] == 0.59903, Vmin[5.3, 1] == 3.02756}, {a, b, c, d, e, f}]
{{a -> -0.0286817, b -> 0.585892, c -> 0.068715, d -> -0.312783, e -> -0.045775, f -> 0.0825833}}

Amin[Amout_, fr_] := g + h * Amout + i * fr + j * fr^2 + k * Amout * fr + l * Amout * fr^2
Solve[{Amin[0.2, 0.2] == 0.306192, Amin[3, 0.2] == 2.03284, Amin[0.2, 0.5] == 0.317526, Amin[3, 0.5] == 2.08189,
  Amin[0.2, 1] == 0.307772, Amin[3, 1] == 2.50034}, {g, h, i, j, k, l}]
{{g -> 0.163415, h -> 0.6403, i -> 0.124595, j -> -0.13685, k -> -0.18344, l -> 0.3262}}
```

Figura 88: Algoritmo empleado en Mathematica 8 para la obtención de las ecuaciones de superficie





Conseguimos, de esta forma, dos ecuaciones de superficie, una de valor medio de entrada en función del valor medio de salida y la frecuencia (12), y otra equivalente para la amplitud (13).

$$Vm_{in}(Vm_{out}, f) = -0.02868 + 0.58589 \cdot Vm_{out} + 0.06872 \cdot f - 0.31278 \cdot f^2 - 0.04578 \cdot Vm_{out} \cdot f + 0.08258 \cdot Vm_{out} \cdot f^2 \quad (12)$$

$$A_{in}(A_{out}, f) = 0.16342 + 0.64030 \cdot A_{out} + 0.12460 \cdot f - 0.13685 \cdot f^2 - 0.18344 \cdot A_{out} \cdot f + 0.32620 \cdot A_{out} \cdot f^2 \quad (13)$$

Todos los coeficientes calculados en este anexo o en posteriores calibraciones del sistema se almacenarán en un archivo de MatLab llamado "coeff.mat" leído por el software de control, evitando así la necesidad de cambios en el propio código, dispuesto de la siguiente forma:

- Vector P\_V: vector de coeficientes de la electroválvula proporcional:
  - P\_V (1) = término independiente.
  - P\_V (2) = grado 1.
- Vector V\_Fest: vector de coeficientes del modo de carga estático:
  - V\_Fest (1) = término independiente.
  - V\_Fest (2) = grado 1.
- Vectores V\_vm y V\_am: vectores de coeficientes del modo de carga dinámico, para el valor medio y la amplitud respectivamente:
  - V\_vm/am (1) = término independiente.
  - V\_vm/am (2) = grado 1 de magnitud principal.
  - V\_vm/am (3) = grado 1 de frecuencia.
  - V\_vm/am (4) = grado 2 de frecuencia.
  - V\_vm/am (5) = grado 1 de ambas magnitudes.
  - V\_vm/am (6) = grado 1 de magnitud principal y grado 2 de frecuencia.



Para emplear la interfaz en modo de calibración basta con acceder al código de Matlab y activar las líneas de código que presenten el identificador % MdC al final de las mismas, desactivando las equivalentes a las mismas para el modo de ensayo.



# ANEXO IV: APLICACIÓN DE SEGUIMIENTO DE GRIETA

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para  
Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## ANEXO IV: APLICACIÓN DE SEGUIMIENTO DE GRIETA

Paralelamente a la programación del software de control del banco de ensayo, también se ha programado una aplicación que permita la realización de un *tracking* de la grieta, aplicable tanto al banco de ensayo del presente TFG como a cualquier banco de ensayo comercial. Un *tracking* consiste en el seguimiento del crecimiento de la grieta, desde el vértice de la entalla donde se genera hasta su punto final previa a la fractura completa, pudiendo añadirse el análisis otros factores tales como la apertura de la entalla.

La base de la aplicación es la siguiente: en el caso de realizarse sobre un ensayo en tiempo real, cada una determinada cantidad de ciclos emitiremos una señal eléctrica a la cámara y ésta tomará una fotografía, el programa detectará esta nueva fotografía y la analizará, emitiendo unos resultados. En el caso de querer analizar imágenes previamente tomadas de un ensayo sólo debemos ir añadiéndolas secuencialmente a la carpeta destinada para tal fin.

En principio se concibe la aplicación como un método de cálculo automatizado, teniendo el usuario únicamente que pulsar un botón para continuar tras cada toma de una nueva fotografía, obligando así a una supervisión mínima de la consecución del análisis. Sin embargo, la mala calidad superficial de las probetas a ensayar impide que el algoritmo pueda procesar eficientemente las imágenes tomadas, unido también al problema que resulta de la luz de la que se disponga en cada momento ya que el algoritmo funciona principalmente con operaciones binarias. Únicamente con probetas pulidas y pintadas con pintura blanca mate sobre la zona de crecimiento de grieta y sin pintar o pintadas con pintura negra mate sobre la entalla se puede llegar a obtener un buen seguimiento de la grieta. Para solventar en alguna medida este problema, se opta por implementar un modo de empleo manual, en el cual el usuario selecciona sobre la imagen tomada los puntos de inicio y fin de la grieta y de apertura de la entalla tras cada fotografía.



A diferencia de la interfaz del software de control del banco (FTB) que ha sido creada mediante GUIDE (graphical user interface development enviroment), la interfaz de esta aplicación se ha desarrollado de forma programática en su totalidad con el objetivo de un mayor control estético de la misma, siendo llamada “Crack Analsys using crack tracking” (fig. 89). Sin embargo, al igual que en “FTB” se ha buscado una simplicidad de la ejecución del programa mediante desactivaciones de botones en momentos determinados.

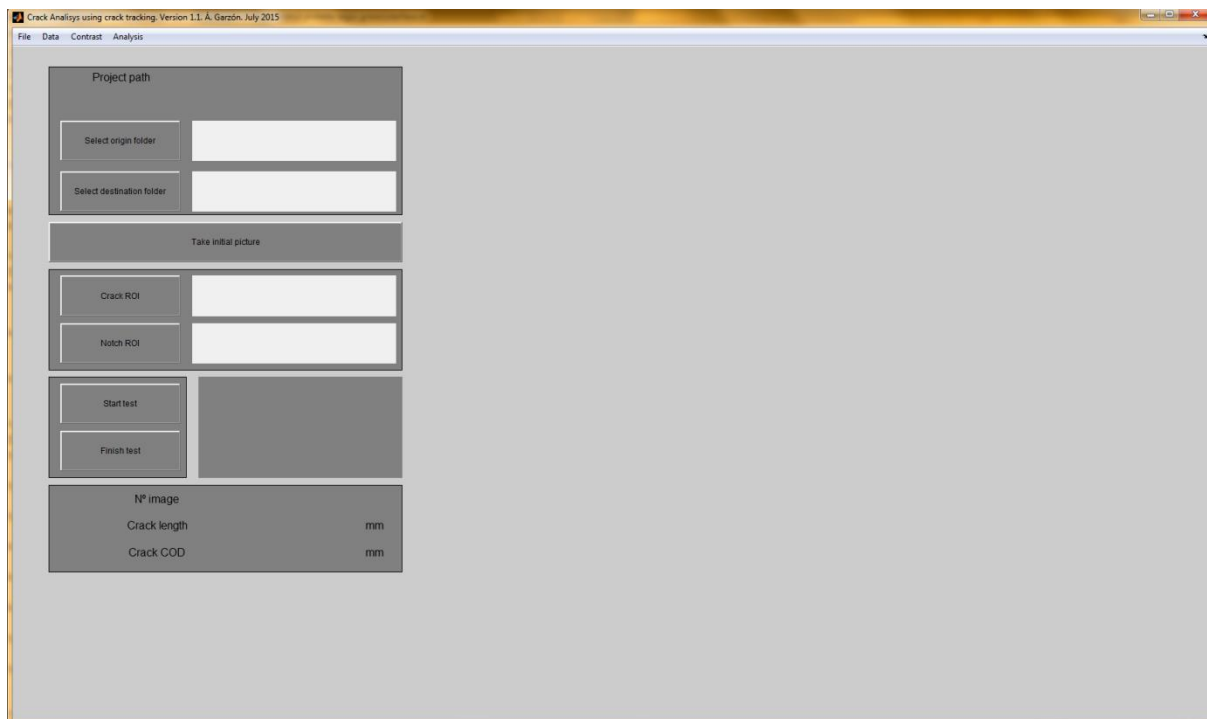


Figura 89: Interfaz gráfica de la aplicación

Pasamos a continuación a la explicación detallada de todas las partes de la aplicación, además de ejemplificar su uso:

- Barra de menús: tenemos una barra de menús (fig. 90) propia para la aplicación dividida en 4 submenús:
  - File: desde aquí podremos crear un nuevo proyecto, abrir uno existente o cerrar el que tengamos abierto. Al crear un nuevo proyecto elegiremos un directorio y automáticamente se genera la

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



carpeta “New Project” con tres subcarpetas en su interior: “Store”, “Analysis” y “Results”. Igualmente deberemos abrir este nuevo proyecto una vez creado.

- Data: nos permite cargar datos de un ensayo anteriormente realizado, no necesariamente finalizado. Por defecto los datos de los ensayos se guardan bajo un fichero de MatLab llamado “Prev\_Data.mat” y este debe ser siempre el nombre para poder cargar los datos. Una vez cargados los datos no se hace necesario abrir el proyecto al que pertenecen.
- Contrast: mediante este submenú podemos acceder a una nueva ventana donde podremos realizar un ensayo de contraste de luz, que veremos con más detalle más adelante. Este ensayo se hace muy útil si disponemos de una fuente de luz aplicable a la probeta a ensayar, pudiendo elegir cual es el rango óptimo que requerimos y ajustándonos lo máximo posible.
- Analysis: podemos seleccionar, como ya se ha mencionado con anterioridad, entre realizar el ensayo automática o manualmente. El modo debe elegirse en cualquier momento antes de comenzar el *tracking*.

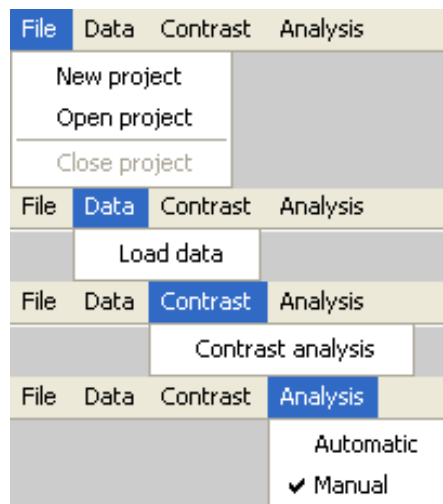


Figura 90: Menús y submenús de la aplicación



- Selección de carpetas: una vez abierto nuestro proyecto podremos observar cómo su directorio aparece en el campo Project path. A continuación debemos seleccionar la carpeta del proyecto que actuará como receptora de las imágenes tomadas desde la cámara, desde el botón Select origin folder, y la carpeta que recogerá los resultados, mediante Select destination folder (fig. 91). Como podemos observar en la figura 92, cada vez que debamos buscar un directorio o cualquier otro elemento posterior, el botón pulsado para tal efecto pasa a quedar relleno en color blanco, para evitar un posible olvido de en qué punto de la preparación del análisis nos encontramos debido a algún tipo de descuido.

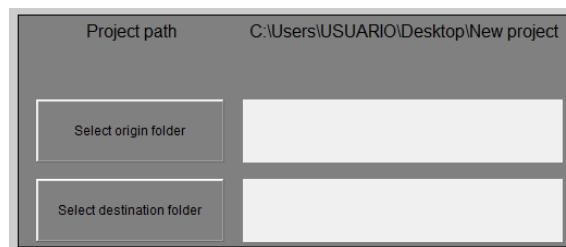


Figura 91: Espacio de selección de carpetas

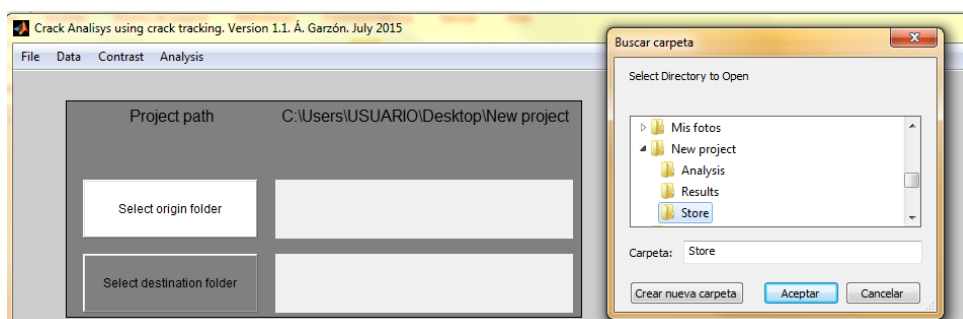


Figura 92: Detalle de detección de pulsado

- Selección de imagen inicial: antes de iniciar el análisis debemos tomar una imagen de la probeta a ensayar para tomarla como base, a ser posible con la misma carga a la que después tomaremos las fotografías. Normalmente esta carga será la carga máxima para poder visualizar mejor la grieta. La aplicación nos hará dos preguntas para asegurarnos de que los equipos



están conectados y la imagen está tomada (fig. 93). Una vez seleccionada la imagen se nos solicitará seleccionar el vértice de la entalla (fig. 94), independientemente de que la grieta ya esté crecida o no, aunque, evidentemente, en el caso de emplear una imagen donde la grieta ya esté ligeramente desarrollada deberemos seleccionar justo el origen de la misma; y la longitud de abertura de la entalla (fig. 95), dato que emplearemos como referencia para calcular la relación pixel/mm del análisis.



Figura 93: Preguntas de seguridad realizadas por la aplicación



Figura 94: Solicitud de entrada mediante ratón del vértice de la entalla

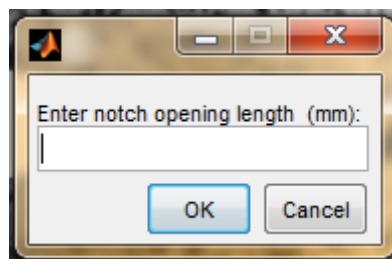


Figura 95: Entrada de dato de abertura de la entalla





- Selección de máscaras: el siguiente paso consiste en crear o seleccionar máscaras o regiones de interés (ROI, region of interest, según sus siglas en inglés) tanto de la grieta como de la entalla (fig. 96). Su empleo es necesario para limitar el área de cálculo de la grieta y de la entalla a las zonas que nos interesan. Si bien no serían necesarias para el modo de análisis manual, sí que se obliga a su creación/selección con el objetivo de tenerlas ya definidas para posibles futuros proyectos.

En el caso de la creación de la máscara seleccionaremos un polígono cerrado alrededor de la región de interés y lo guardaremos con el nombre que elijamos. Posteriormente habrá que seleccionarlo pulsando de nuevo sobre el pulsador que nos ocupe.

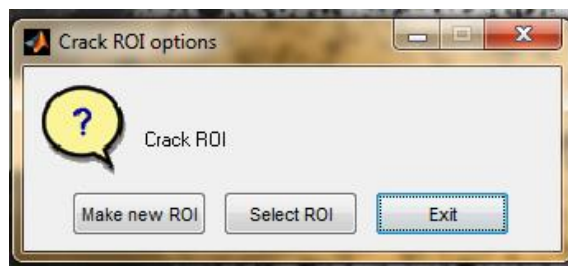


Figura 96: Opciones de máscara

Las zonas de interés que nos surjan serán las siguientes: en el caso de la grieta (fig. 97) elegiremos un contorno dentro del cual podemos predecir que la grieta se crecerá. En el caso de que la grieta ya esté en proceso de crecimiento podemos hacer la máscara más pequeña alrededor de los datos ya conocidos. En el caso de la entalla (fig. 98) seleccionaremos un contorno rectangular, con una altura de aproximadamente cuatro veces su anchura, que acoja en su interior tres contornos diferenciados: el superior y el central deben ser lo más oscuros posibles (pintura negra o la propia mordaza) y el central debe ser la entalla propiamente dicha, de fondo lo más claro posible, denotándose una clara diferencia de color entre ésta y las otras dos.



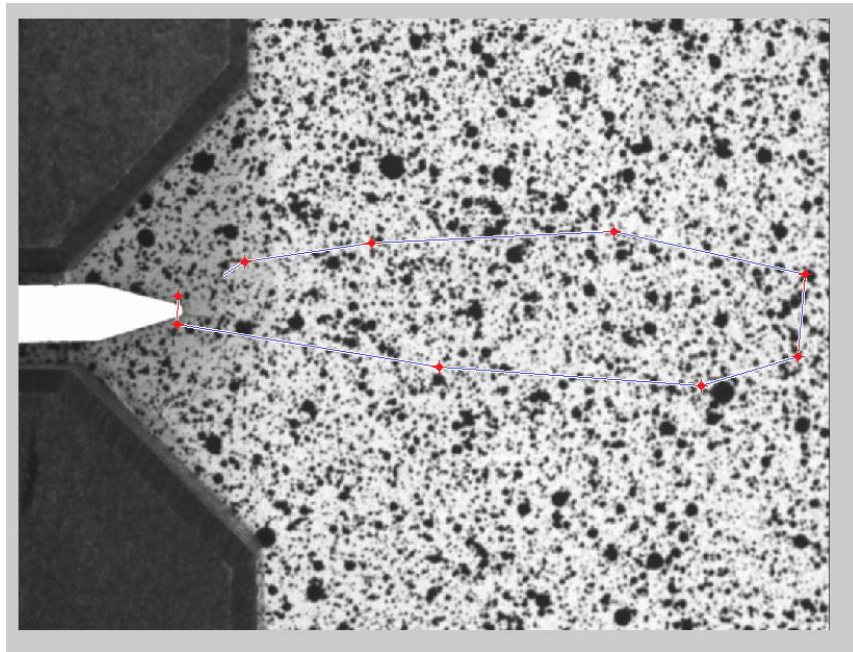


Figura 97: Selección de una máscara de grieta

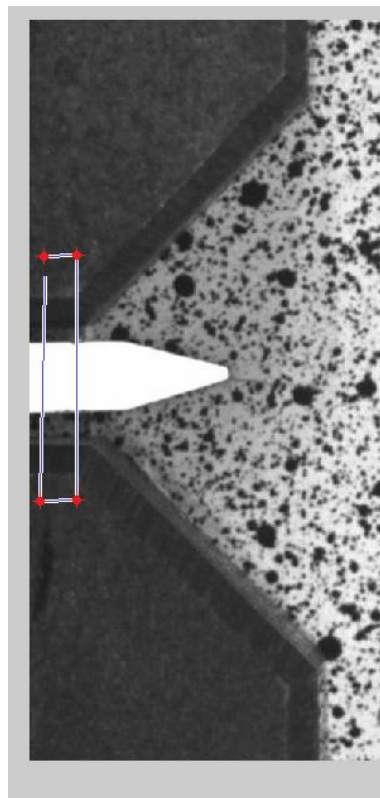


Figura 98: Selección de una máscara de entalla

Una vez seleccionadas las máscaras sus nombres aparecerán en los campos de texto destinados a tal efecto.

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



- Inicio del ensayo: con todos los anteriores pasos debidamente cumplimentados y con la cámara configurada para la toma de imágenes a través de señal externa, podemos comenzar el análisis pulsando Start test.
  - Modo automático: en este modo sólo debemos preocuparnos por aceptar el aviso de imagen nueva recibida cada vez que aparezca (fig. 99).



Figura 99: Aviso de imagen nueva recibida

- Modo manual: en modo manual simplemente debemos seguir las instrucciones que la aplicación nos indica en el cuadro de texto junto a los botones de secuencia de análisis (Start test y Finish test) (fig. 100). En primer lugar seleccionaremos los puntos superior e inferior de entalla para calcular la relación pixel/mm (fig. 101). A

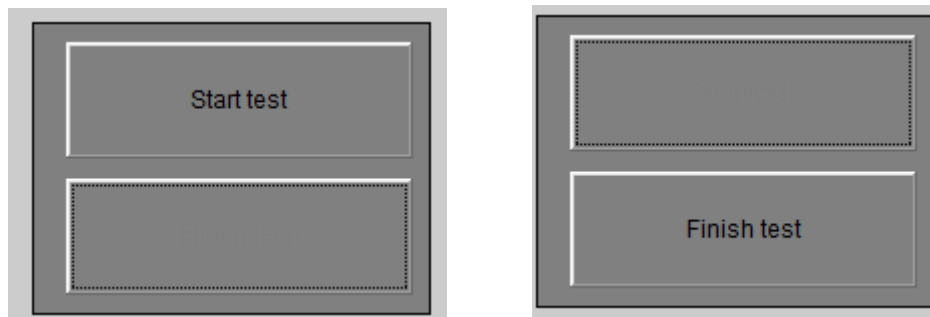


Figura 100: Botones de secuencia de análisis



continuación, para cada nueva imagen, incluida la imagen de base, la aplicación nos solicitará seleccionar los puntos inicial y final de la grieta y los puntos superior e inferior de la entalla (fig. 102).

En todo momento podemos visualizar en la parte inferior izquierda de la interfaz una serie de datos: número de imagen analizada, longitud de la grieta y abertura de la entalla (fig. 103); además de visualizar estos dos últimos datos en una gráfica justo bajo la imagen (fig. 104)

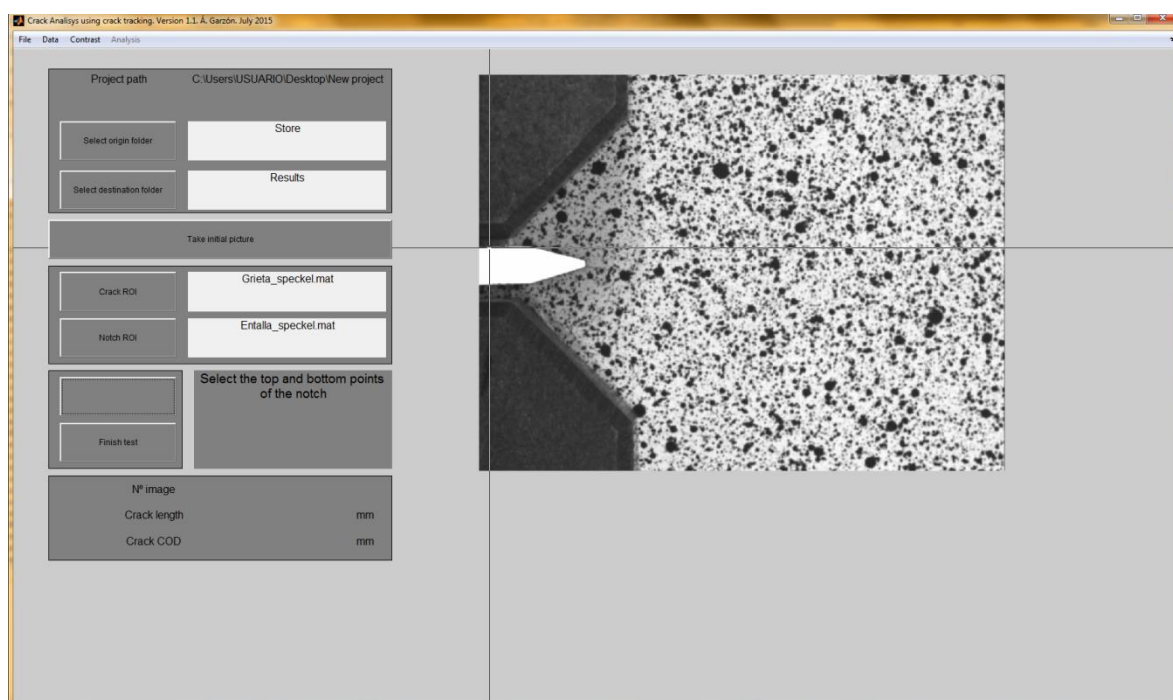


Figura 101: Selección de puntos sobre la entalla

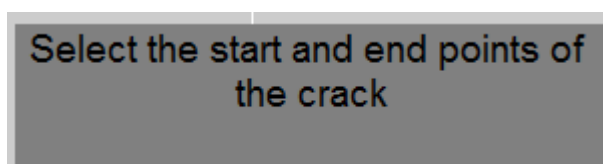


Figura 102: Mensaje de selección de puntos sobre la grieta



|              |         |    |
|--------------|---------|----|
| Nº image     | 5       |    |
| Crack length | 6.98182 | mm |
| Notch COD    | 3       | mm |

Figura 103: Datos puntuales durante el análisis

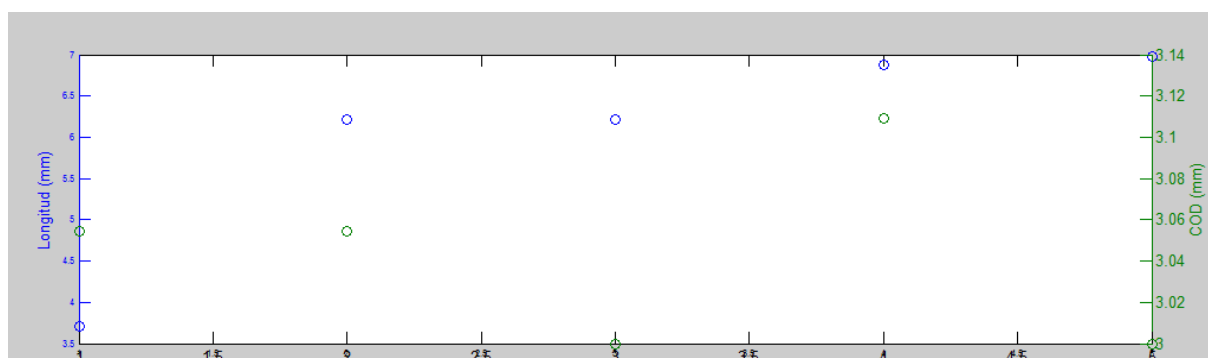


Figura 104: Gráfica de datos del análisis

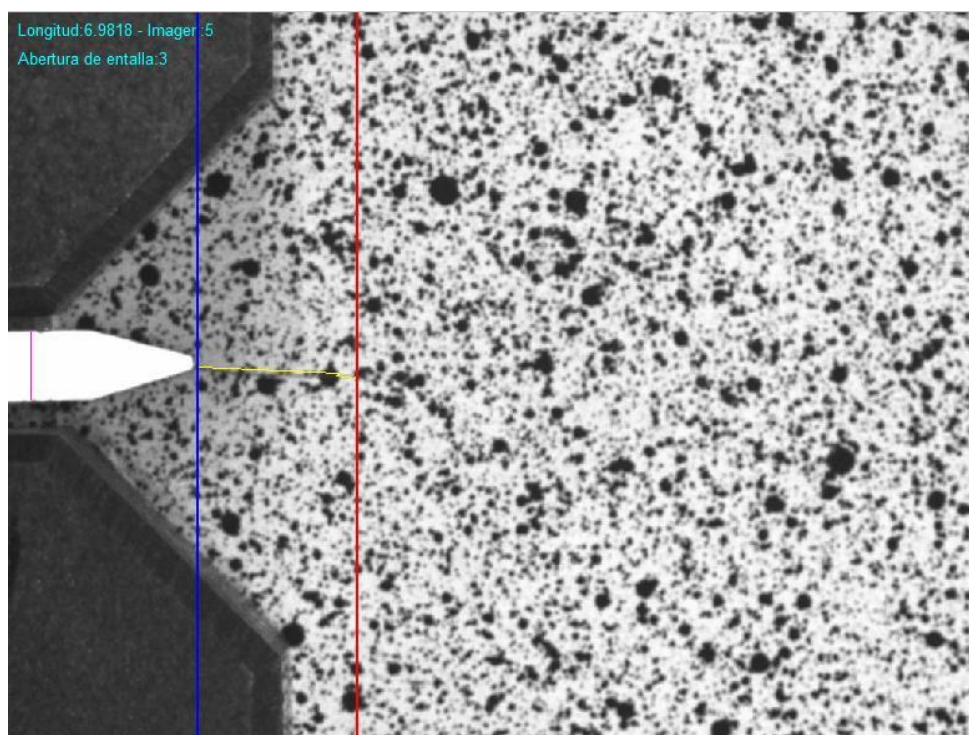


Figura 105: Ejemplo de imagen una vez procesada





#### IV.1. Ensayo de contraste de luz

Como ya se ha mencionado al comienzo de este anexo, la luz que recibe la probeta durante la toma de fotografías es de suma importancia para un buen funcionamiento del algoritmo en modo automático. Una solución para regular este nivel de luminosidad es con el empleo de una fuente de luz regulable (fig. 106).



Figura 106: Fuente de luz regulable con emisión por fibra óptica

Para acceder al ensayo debemos acceder desde el menú Contrast (fig. 90). Una vez pulsado el botón una nueva ventana se abrirá:

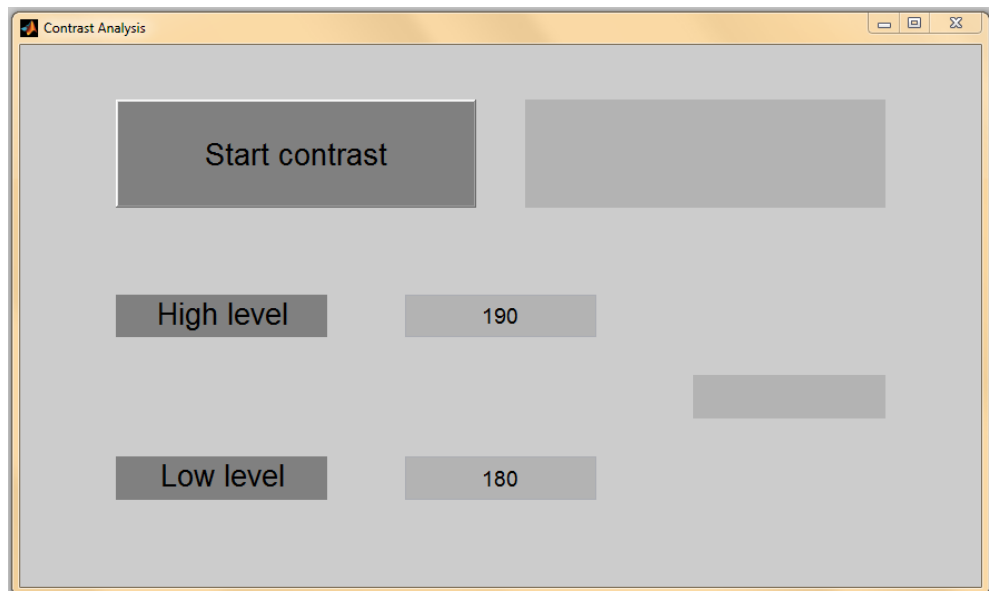


Figura 107: Ventana de ensayo de contraste de luz



Los niveles máximo y mínimo de luz pueden regularse manualmente en un rango de 0 a 255, según las necesidades del ensayo, aunque se recomienda un rango de nivel de 180 a 190.

Para comenzar tomamos una fotografía en las mismas condiciones que las fotografías que serán tomadas durante el análisis de seguimiento de grieta y pulsamos sobre Start contrast. Se nos solicitará seleccionar una carpeta y nosotros elegiremos la carpeta donde almacenaremos las fotografías para este contraste.

El algoritmo de análisis detecta cada vez que tomamos una nueva imagen y calcula su nivel de luminosidad, que aparecerá indicado en la parte derecha de la ventana (fig. 107). En función de lo alejado que esté este valor del rango solicitado el fondo aparecerá con distinto color (fig. 109), con el objetivo de hacerse una idea de en qué valores nos movemos si el usuario se encuentra alejado del ordenador, por ejemplo, manipulando la fuente de luz regulable.

En el momento en que la luminosidad de la imagen se adecúa al rango establecido el algoritmo se detiene (fig. 108) y podemos cerrar la ventana para comenzar con el análisis de crecimiento de la grieta.

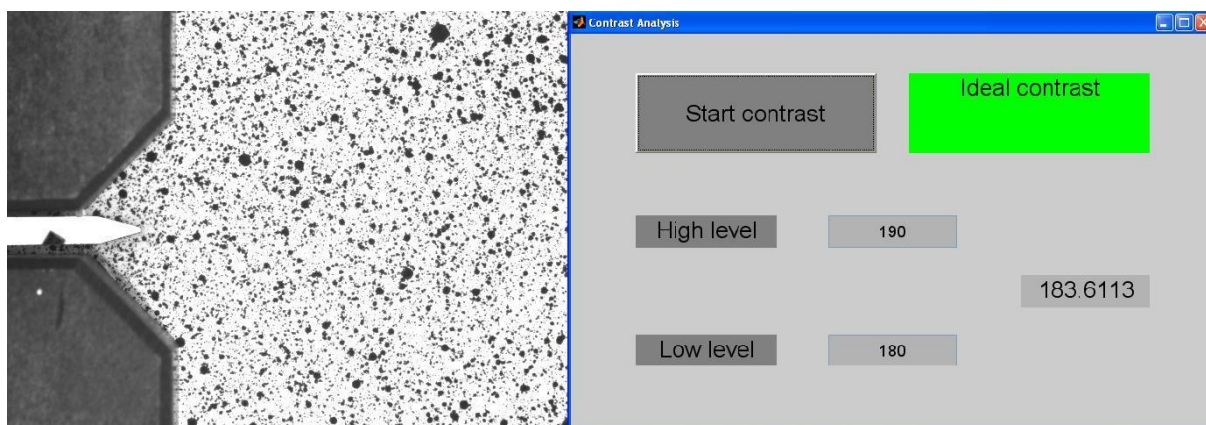


Figura 108: Detección de contraste adecuado según el intervalo establecido



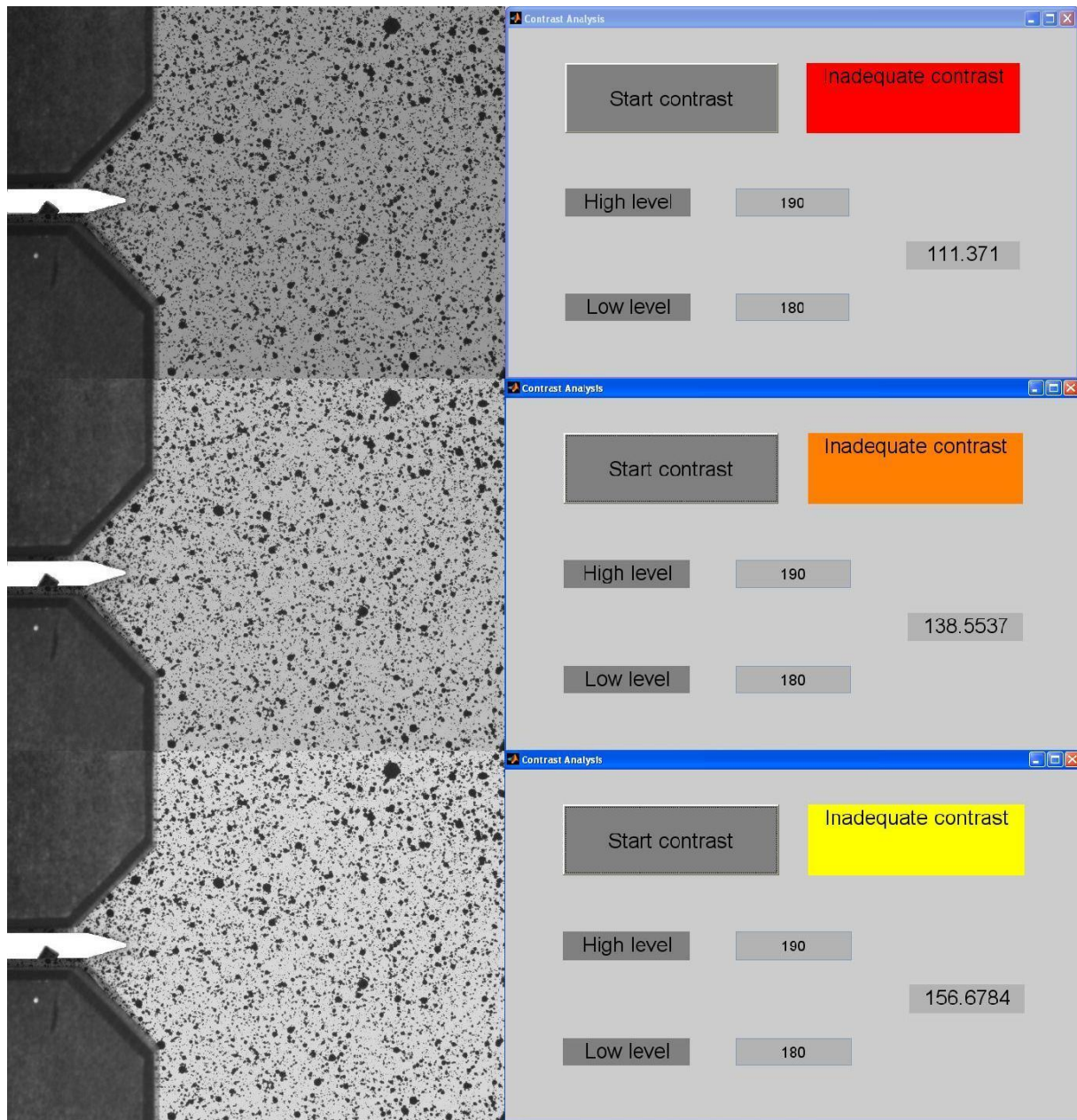


Figura 109: Distintos resultados emitidos por el algoritmo en función de la luz aplicada mediante la fuente de luz regulable





# ANEXO V: SOFTWARE DE CONTROL DEL BANCO DE ENSAYO

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para  
Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## ANEXO V: SOFTWARE DE CONTROL DEL BANCO DE ENSAYO

```
function varargout = FTB(varargin)
```

```
% Variables empleadas en la aplicación ordenadas alfabéticamente:
% - a: variable usada como identificativo de la conexión MatLab-Arduino.
% - am: amplitud de carga solicitada (kN).
% - amard: amplitud de voltaje aplicado a Arduino (V (0-255)).
% - amCelula: amplitud de carga experimental (kN).
% - amFteo: amplitud de carga teórica (kN).
% - amV: amplitud de voltaje aplicado a ITV (V (0-5)).
% - Cam: variable asociada al pin de la cámara.
% - Cel: variable asociada al pin de la célula de carga.
% - celula: lectura de la célula de carga (V (0-1023)).
% - Celula: vector de lecturas de la célula de carga.
% - coeff: vector de almacenamiento de los coeficientes de las funciones
% de cálculo empleadas.
% - cont_ciclos: contador de loc ciclos de carga.
% - desp: variable auxiliar empleada para determinar el puerto COM
% conectado.
% - dia: variable que almacena el día de la toma de datos.
% - disparo: push_cont_ciclos de disparo de la cámara.
% - estado: estado del sistema en todo momento.
%   · vacío: estado del sistema sin probeta colocada o sin importar la
%   existencia de la misma.
%   · inicial: estado sin carga del sistema, habiendo sido cargada
%   antes.
%   · subiendo_colocacion: cilindro subiendo en modo colocación.
%   · bajando_colocacion: cilindro bajando en modo colocación.
%   · precarga: cilindro aplicando precarga.
%   · ciclo_carga: cilindro aplicando ciclo de carga.
%   · descarga: cilindro en descarga.
%   · pausa_ciclo: estado del sistema aplicando valor medio de carga
%   tras haber ciclado.
% - EV1: variable asociada al pin de la electroválvula 1.
% - EV2: variable asociada al pin de la electroválvula 2.
% - EV3: variable asociada al pin de la electroválvula 3.
% - fid: identificador de archivo.
% - filename: nombre del archivo.
% - fin: variable que permite dejar abierto el ciclo central de la
% aplicación.
% - fp: (first picture) variable empleada en el disparo de imagen.
% - Fscalacel: factor de escala de la célula de carga (kN/V).
% - Fscalacel_new: factor de escala seleccionado en la iteración actual.
% - fteo: carga teórica puntual (kN).
% - Fteo: vector de fuerzas teóricas.
% - hora: variable que almacena la hora de la toma de datos.
% - lectura: push_cont_ciclos de lectura para la escritura de documento de
% registro.
% - maxCelula: valor máximo de la carga experimental (kN).
% - maxFteo: valor máximo de la carga teórica (kN).
% - maxV: valor máximo de voltaje aplicado a ITV (V (0-5)).
% - minCelula: valor mínimo de la carga experimental (kN).
% - minFteo: valor mínimo de la carga teórica (kN).
% - minV: valor mínimo de voltaje aplicado a ITV (V (0-5)).
```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

% - pend_actual: pendiente actual de la señal del ciclo de carga.
% - puerto: puerto COM conectado a Arduino.
% - sig: variable asociada al pin de emisión de la señal eléctrica de
% ITV.
% - t: variable que nos permite calcular los datos temporales.
% - tiempo: variable que almacena día y hora de la toma de datos.
% - tipo_carga: modo de trabajo de la aplicación.
%   · colocacion: colocacion del cilindro para posicionamiento de
%   probeta.
%   · precarga: precarga de la probeta.
%   · ciclo_carga: aplicación de ciclo de carga a la probeta.
%   · descarga: descarga de la probeta.
% - v: voltaje puntual aplicado al ITV (V (0-5)).
% - V: vector de voltajes aplicados al ITV.
% - varaux_closefile: variable auxiliar de comprobación de cierre de
% archivo.
% - varaux_cont_ciclos: variable auxiliar de determinación de los ciclos
% de carga.
% - varaux_descarga: variable auxiliar empleada para conocer el estado de
% la descarga, debido a la forma especial a la que la realizamos.
% - varaux_disparo y varaux_disparo_2: variables auxiliares empleadas en
% el disparo de imagen.
% - varaux_grafica: variable auxiliar para la representación gráfica de
% los datos.
% - varaux_prev_v: variable auxiliar empleada para el conteo de
% ciclos.
% - varaux_vard: variable auxiliar que define la velocidad de descarga.
% - vard: voltaje puntual aplicado a Arduino (V (0-255)).
% - vec_datos: vector de almacenamiento de datos para el documento de
% registro.
% - vmard: valor medio de voltaje aplicado a Arduino (V (0-255)).
% - vmCelula: valor medio de la carga experimental (kN).
% - vmFteo: valor medio de la carga teórica (kN).
% - vmV: valor medio de voltaje aplicado a ITV (V (0-5)).
% - x: coordenada temporal puntual (s).
% - X: vector de coordenadas temporales.
% - xlim: cantidad de datos temporales representados gráficamente (s).
% - ydown: coordenada de representación del eje y de la gráfica inferior.
% - yup: coordenada de representación del eje y de la gráfica superior.

```

```

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @FTB_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @FTB_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

function FTB_OpeningFcn(hObject, ~, handles, varargin)

global EV1 EV2 EV3 estado Cel disparo tipo_carga Cam lectura puerto sig vard fteo xlim

% Función ejecutada al abrir el programa. Se inicializan variables y se
% asignan valores predeterminados principalmente.

% Damos valor inicial a variables que necesitamos desde el inicio.

tipo_carga = 'colocacion'; % Modo colocación predeterminado.
puerto = 'COM3'; % Puerto COM3 predeterminado.
sig = 3; % Pin donde emitiremos la señal eléctrica.
EV1 = 4; % Electroválvula 1 asignada a pin número 4.
EV2 = 5; % Electroválvula 2 asignada a pin número 5.
EV3 = 6; % Electroválvula 3 asignada a pin número 6.
Cel = 8; % Célula de carga asignada a pin número 8.
Cam = 49; % Cámara asignada a pin número 49.
estado = 'vacío';
disparo = 0; % Ciclos de disparo de la cámara. 0 predeterminado.
lectura = 20; % Ciclos de lectura para la escritura de documento de
% registro. 20 predeterminado.
vard = 0;
fteo = 0;
xlim = 10;

% Estados iniciales
set(handles.text_vmr,'String','');
set(handles.edit_vmr,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.edit_vmr,'String','');
set(handles.text_amr,'String','');
set(handles.edit_amr,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.edit_amr,'String','');
set(handles.text_frec,'String','');
set(handles.edit_frec,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.edit_frec,'Visible','off');
set(handles.text_vmr_kN,'Visible','off');
set(handles.text_amr_kN,'Visible','off');
set(handles.text_frec_Hz,'Visible','off');
set(handles.push_conectar_arduino,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.push_desconectar_arduino,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.text_estado_arduino,'Visible','off');
set(handles.push_subir,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.push_subir,'String','');
set(handles.push_stop,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.push_stop,'String','');
set(handles.push_bajar,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.push_bajar,'String','');
set(handles.text_cont_ciclos,'Visible','off');
set(handles.push_cont_ciclos,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.text_ciclos_lectura,'Visible','off');
set(handles.edit_ciclos_lectura,'String',lectura);
set(handles.edit_ciclos_lectura,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.text_ciclos_captura,'Visible','off');
set(handles.edit_ciclos_captura,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.modos_de_carga,'Visible','off');

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

set(handles.colocacion,'Enable','off');
set(handles.precarga,'Enable','off');
set(handles.carga,'Enable','off');
set(handles.push_finalizar,'Enable','off','Visible','off');
set(handles.descarga,'Enable','off');
set(handles.fondo_escala,'Visible','off');
set(handles.push_fondo_escala,'Visible','off');
axis(handles.axes1,'off');
axis(handles.axes2,'off'); % Eliminamos la visión de los ejes de
% coordenadas en ambas gráficas.
set(handles.colocacion,'Value',1);

set(handles.text_v,'Visible','off')
set(handles.text_v_V,'Visible','off')
set(handles.text_fteo,'Visible','off')
set(handles.text_fteo_kN,'Visible','off')
set(handles.text_celula,'Visible','off')
set(handles.text_celula_kN,'Visible','off')
set(handles.text_maximo,'Visible','off')
set(handles.text_minimo,'Visible','off')
set(handles.text_valor_medio,'Visible','off')
set(handles.text_amplitud,'Visible','off')
set(handles.text_signal_electrica,'Visible','off')
set(handles.text_carga_teorica,'Visible','off')
set(handles.text_celula_carga,'Visible','off')
set(handles.text_maxV,'Visible','off')
set(handles.text_minV,'Visible','off')
set(handles.text_vmV,'Visible','off')
set(handles.text_amV,'Visible','off')
set(handles.text_maxFteo,'Visible','off')
set(handles.text_minFteo,'Visible','off')
set(handles.text_vmFteo,'Visible','off')
set(handles.text_amFteo,'Visible','off')
set(handles.text_maxCelula,'Visible','off')
set(handles.text_minCelula,'Visible','off')
set(handles.text_vmCelula,'Visible','off')
set(handles.text_amCelula,'Visible','off')

handles.output = hObject;

set(hObject,'CloseRequestFcn',@close_fcn); % Con esta linea obligamos a
% cerrar la GUI desde el botón push_exit.
guidata(hObject, handles);

function varargout = FTB_OutputFcn(~, ~, handles)
varargout{1} = handles.output;

function lista_puertos_Callback(~, ~, handles)

% Desplegable que permite la selección del puerto COM empleado para la
% tarjeta Arduino.

global puerto

desp = get(handles.lista_puertos,'Value');
switch desp

```



```

case 1
    puerto = 'COM1';
case 2
    puerto = 'COM2';
case 3
    puerto = 'COM3';
case 4
    puerto = 'COM4';
case 5
    puerto = 'COM5';
case 6
    puerto = 'COM6';
case 7
    puerto = 'COM7';
case 8
    puerto = 'COM8';
end

set(handles.push_conectar_arduino,'Enable','on','Visible','on');

function lista_puertos_CreateFcn(hObject, ~, ~)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function push_conectar_arduino_Callback(~, ~, handles)

global a EV1 EV2 EV3 Cel fin Celula vard fteo cont_ciclos disparo tipo_carga estado filename fid Cam
lectura puerto sig vm am freq varaux_closefile xlim varaux_vard

set(handles.push_conectar_arduino,'Enable','off');
set(handles.push_exit,'Enable','off');
set(handles.text_estado_arduino,'Visible','on');
set(handles.text_estado_arduino,'String','Conectando con Arduino...');

a = arduino(puerto); % Variable de conexión de Arduino.
pinMode(a,EV1,'output'); digitalWrite(a,EV1,0); % Inicialización de la electroválvula 1.
pinMode(a,EV2,'output'); digitalWrite(a,EV2,0); % Inicialización de la electroválvula 2.
pinMode(a,EV3,'output'); digitalWrite(a,EV3,0); % Inicialización de la electroválvula 3.
pinMode(a,sig,'output'); % Inicializamos la emisión de la señal eléctrica del ciclo.
pinMode(a,Cel,'input'); % Inicializamos la lectura de la célula de carga.
pinMode(a,Cam,'output'); digitalWrite(a,Cam,0);% Inicializamos la cámara fotográfica.

set(handles.push_subir,'Enable','on','Visible','on');
set(handles.push_subir,'String','Subir cilindro');
set(handles.push_stop,'Visible','on');
set(handles.push_stop,'String','Stop');
set(handles.push_bajar,'Enable','on','Visible','on');
set(handles.push_bajar,'String','Bajar cilindro');
set(handles.precarga,'Enable','on');
set(handles.push_desconectar_arduino,'Enable','on','Visible','on');
set(handles.push_finalizar,'Enable','on','Visible','on');
set(handles.modos_de_carga,'Visible','on');

set(handles.fondo_escala,'Visible','on');
set(handles.push_fondo_escala,'Visible','on');

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

set(handles.text_v,'Visible','on')
set(handles.text_v_V,'Visible','on')
set(handles.text_fteo,'Visible','on')
set(handles.text_fteo_kN,'Visible','on')
set(handles.text_celula,'Visible','on')
set(handles.text_celula_kN,'Visible','on')
set(handles.text_maximo,'Visible','on')
set(handles.text_minimo,'Visible','on')
set(handles.text_valor_medio,'Visible','on')
set(handles.text_amplitud,'Visible','on')
set(handles.text_signal_electrica,'Visible','on')
set(handles.text_carga_teorica,'Visible','on')
set(handles.text_celula_carga,'Visible','on')
set(handles.text_maxV,'Visible','on')
set(handles.text_minV,'Visible','on')
set(handles.text_vmV,'Visible','on')
set(handles.text_amV,'Visible','on')
set(handles.text_maxFteo,'Visible','on')
set(handles.text_minFteo,'Visible','on')
set(handles.text_vmFteo,'Visible','on')
set(handles.text_amFteo,'Visible','on')
set(handles.text_maxCelula,'Visible','on')
set(handles.text_minCelula,'Visible','on')
set(handles.text_vmCelula,'Visible','on')
set(handles.text_amCelula,'Visible','on')

```

```

load coeff
coeff(1) = P_V(1); coeff(2) = P_V(2);
coeff(3) = V_Fest(1); coeff(4) = V_Fest(2);
coeff(5) = V_vm(1); coeff(6) = V_vm(2);
coeff(7) = V_vm(3); coeff(8) = V_vm(4);
coeff(9) = V_vm(5); coeff(10) = V_vm(6);
coeff(11) = V_am(1); coeff(12) = V_am(2);
coeff(13) = V_am(3); coeff(14) = V_am(4);
coeff(15) = V_am(5); coeff(16) = V_am(6);

```

```

%tipo_carga = 'colocacion'; % Iniciamos en modo de colocación y lo seleccionamos.

```

```

Fteo = 0;
fin = 0;
X = 0;
Celula = analogRead(a,Cel);
v = 0;
V = 0;
cont_ciclos = 0;
Fscalacel = 1.5347;
varaux_cont_ciclos = -1;
varaux_descarga = 0;
varaux_disparo = 0;
fp = 1;
Foto = 0;
set(handles.text_estado_arduino,'String','Conexión completa');

```

```

filename = inputdlg('Introduzca nombre del archivo: ','ARCHIVO'); % Introducimos el nombre del
archivo de Word donde guardaremos los datos. Si se cancela sin introducir nombre no se crea ningún
archivo.

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

if isempty(filename)
else
    filename = strcat(filename, '.doc');
    filename = num2str(cell2mat(filename));
    fid = fopen(filename, 'w');
end
pause(1);
t = tic;
while fin == 0
    if strcmp(tipo_carga, 'colocacion') && strcmp(estado, 'inicial')
        vard = 0;
        fteo = 0;
    elseif strcmp(tipo_carga, 'colocacion') && strcmp(estado, 'bajando_colocacion') % Bajada en
colocación
        vard = 40;
        fteo = ((vard * 5 / 255) * coeff(2) + coeff(1)) * 0.1348;
        if varaux_descarga == 1
            tipo_carga = 'descarga';
            estado = 'descarga';
            vard = 30;
            fteo = ((vard * 5 / 255) * coeff(2) + coeff(1)) * 0.1348;
            varaux_vard = vard;
            varaux_descarga = 2;
        end
    elseif strcmp(tipo_carga, 'precarga') && strcmp(estado, 'precarga')
        vmard = round((coeff(4) * vm + coeff(3)) * 255 / 5); % Pasamos de voltaje (0-5) a (0-255)
        %vmard = round(vm * 255 / 5); % MdC
        if vard ~= vmard
            vard = vard + 1;
            fteo = vard * vm / vmard; % Precargamos en rampa
            if vard >= vmard
                vard = vmard;
                fteo = vm;
            end
        end
    elseif strcmp(tipo_carga, 'ciclo_carga') && strcmp(estado, 'ciclo_carga')
        vmard = (coeff(5) + coeff(7) * freq + coeff(8) * freq^2 + coeff(6) * vm + coeff(9) * vm * freq +
coeff(10) * freq^2 * vm) * 255 / 5;
        amard = (coeff(11) + coeff(13) * freq + coeff(14) * freq^2 + coeff(12) * am + coeff(15) * am * freq
+ coeff(16) * freq^2 * am) * 255 / 5;
        %vmard = vm * 255 / 5; % MdC
        %amard = am * 255 / 5; % MdC
        vard = round(vmard + amard * sin(2 * pi * freq * x));
        fteo = vm + am * sin(2 * pi * freq * x);
        if vard >= 255
            vard = 255;
        elseif vard <= 0
            vard = 0;
        end
    elseif strcmp(tipo_carga, 'ciclo_carga') && strcmp(estado, 'pausa_ciclo')
        vmard = round((coeff(4) * vm + coeff(3)) * 255 / 5);
        %vmard = round(vm * 255 / 5); % MdC
        vard = vmard;
        fteo = vm;
    elseif strcmp(tipo_carga, 'descarga') && strcmp(estado, 'descarga')
        if vard ~= 0

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





```

varaux_vard = varaux_vard - 0.7;
vard = round(varaux_vard);
fteo = vard * vm / vmard ;
if vard <= 0
    vard = 0;
    fteo = 0;
    if varaux_descarga == 0
        varaux_descarga = 1;
        tipo_carga = 'colocacion';
        estado = 'bajando_colocacion';
    elseif varaux_descarga == 2
        varaux_descarga = 0;
    end
    digitalWrite(a, EV1, 0);
    digitalWrite(a, EV2, 0);
    digitalWrite(a, EV3, 1);
end
end
end
analogWrite(a,sig,vard);
varaux_prev_v = v; % Guardamos en la variable "varaux_prev_v" el último valor emitido en tensión.
Empleado para el conteo de ciclos.
celula = analogRead(a,Cel) / 1023 * 5;
Fscalacel_new = get(handles.fondo_escala,'Value');
if Fscalacel ~= Fscalacel_new
    switch Fscalacel_new
        case 1
            Fscalacel = 1.5347;
            yup = 5;
            ydown = 8;
        case 2
            Fscalacel = 1.0589;
            yup = 3.4;
            ydown = 5.4;
        case 3
            Fscalacel = 0.8213;
            yup = 2.5;
            ydown = 4;
        case 4
            Fscalacel = 0.5246;
            yup = 1.7;
            ydown = 2.7;
        case 5
            Fscalacel = 0.2632;
            yup = 0.84;
            ydown = 1.4;
    end
end
end

```

celula = celula \* Fscalacel; % Obtenemos el valor de la célula de carga. Este valor oscila entre 0 y 1023, por lo tanto se divide entre 1023 para normalizarlo y se multiplica por 5 V que es el voltaje máximo que se puede obtener. A continuación se multiplica este valor por el factor de escala correspondiente al fondo de escala seleccionado. Por defecto trabajaremos con el fondo de escala de 15 kN debido a las limitaciones de Arduino, lo que nos permitirá alcanzar valores máximos de 7.5 kN.

Celula = [Celula celula];



```

x = toc(t);
X = [X x];
v = vard / 255 * 5;
V = [V v];
Fteo = [Fteo fteo];
set(handles.text_celula,'String',celula);
set(handles.text_v,'String',v);
set(handles.text_fteo,'String',fteo);
if x <= xlim
    plot(handles.axes1, X, V,'c'); set(handles.axes1,'XTickLabel',[],'Color',[0.3 0.3 0.3]);
axis(handles.axes1,[0 xlim 0 yup]); grid(handles.axes1,'minor'); ylabel(handles.axes1, 'Voltaje entrada
(V)')%title(handles.axes1,'Salida ITV (V)');
    plot(handles.axes2, X, Celula,'r', X, Fteo,'g'); set(handles.axes2,'XTickLabel',[],'Color',[0.3 0.3
0.3]); axis(handles.axes2,[0 xlim 0 ydown]); grid(handles.axes2,'minor'); ylabel(handles.axes2, 'Carga
salida (kN)')%title(handles.axes2,'Lectura célula (V)');
    maxCelula = max(Celula); minCelula = min(Celula); vmCelula = (maxCelula + minCelula)/2;
amCelula = (maxCelula - minCelula)/2;
    maxV = max(V); minV = min(V); vmV = (maxV + minV) / 2; amV = (maxV - minV) / 2;
    maxFteo = max(Fteo); minFteo = min(Fteo); vmFteo = (maxFteo + minFteo) / 2; amFteo =
(maxFteo - minFteo) / 2;
else
    varaux_grafica = find(X <= x-xlim,1,'last');
    Celula = Celula(varaux_grafica:end);
    X = X(varaux_grafica:end);
    V = V(varaux_grafica:end);
    Fteo = Fteo(varaux_grafica:end);
    plot(handles.axes1, X, V,'c'); set(handles.axes1,'XTickLabel',[],'Color',[0.3 0.3 0.3]);
axis(handles.axes1,[x-xlim x 0 yup]); grid(handles.axes1,'minor'); ylabel(handles.axes1, 'Voltaje
entrada (V)')%title(handles.axes1,'Salida ITV (V)');
    plot(handles.axes2, X, Celula,'r',X, Fteo,'g'); set(handles.axes2,'XTickLabel',[],'Color',[0.3 0.3
0.3]); axis(handles.axes2,[x-xlim x 0 ydown]); grid(handles.axes2,'minor'); ylabel(handles.axes2,
'Carga salida (kN)')%title(handles.axes2,'Lectura célula (V)');
    maxCelula = max(Celula); minCelula = min(Celula); vmCelula = (maxCelula + minCelula) / 2;
amCelula = (maxCelula - minCelula) / 2;
    maxV = max(V); minV = min(V); vmV = (maxV + minV) / 2; amV = (maxV - minV) / 2;
    maxFteo = max(Fteo); minFteo = min(Fteo); vmFteo = (maxFteo + minFteo) / 2; amFteo =
(maxFteo - minFteo) / 2;
end
pend_actual = v - varaux_prev_v; % Averiguamos si la pendiente es ascendente o descendente.
if strcmp(tipo_carga,'ciclo_carga') && strcmp(estado,'ciclo_carga')
    if freq < 0.25
        prop_lec = 1.1;
        prop_disp = 0.97;
    elseif freq < 0.5
        prop_lec = 1.2;
        prop_disp = 0.94;
    elseif freq < 0.75
        prop_lec = 1.3;
        prop_disp = 0.91;
    elseif freq < 1
        prop_lec = 1.4;
        prop_disp = 0.88;
    elseif freq < 1.25
        prop_lec = 1.5;
        prop_disp = 0.84;
    else

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

prop_lec = 1.6;
prop_disp = 0.8;
end
if v < prop_lec*vmV & v > (2-prop_lec)*vmV & pend_actual > 0 & varaux_cont_ciclos == -1
    cont_ciclos = cont_ciclos + 0.5;
    set(handles.push_cont_ciclos,'String',floor(cont_ciclos));
    varaux_cont_ciclos = 1;
    if mod(cont_ciclos,lectura) == 0 && floor(cont_ciclos) - cont_ciclos == 0 && isempty(filename)
== 0
        tiempo = clock; dia = tiempo(1:3); hora = tiempo(4:6);
        vec_datos = [cont_ciclos v vmV amV maxV minV fteo vmFteo amFteo maxFteo minFteo
celula vmCelula amCelula maxCelula minCelula];
        fprintf(fid, 'Fecha: %1.0f-%1.0f-%1.0ftHora: %1.0f:%1.0f:%1.0f\n', dia(3), dia(2), dia(1), hora);
        fprintf(fid, 'Ciclos Vin(V)\t vm(V)\t am(V)\t Vmax(V)\t Vmin(V)\n');
        fprintf(fid, '%1.0ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft\n', vec_datos(1:6));
        fprintf(fid, '\t Fin(kN)\t vm(kN)\t am(kN)\t Fmax(kN)\t Fmin(kN)\n');
        fprintf(fid, '\t %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft\n', vec_datos(7:11));
        fprintf(fid, '\t CC(kN)\t vmCC(kN)\t amCC(kN)\t CCmax(kN)\t CCmin(kN)\n');
        fprintf(fid, '\t %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft\n', vec_datos(12:end));
    end
elseif v < prop_lec*vmV & v > (2-prop_lec)*vmV & pend_actual < 0 & varaux_cont_ciclos == 1
    cont_ciclos = cont_ciclos + 0.5;
    set(handles.push_cont_ciclos,'String',floor(cont_ciclos));
    varaux_cont_ciclos = -1;
    if mod(cont_ciclos,lectura) == 0 && floor(cont_ciclos) - cont_ciclos == 0 && isempty(filename)
== 0
        tiempo = clock; dia = tiempo(1:3); hora = tiempo(4:6);
        vec_datos = [cont_ciclos v vmV amV maxV minV fteo vmFteo amFteo maxFteo minFteo
celula vmCelula amCelula maxCelula minCelula];
        fprintf(fid, 'Fecha: %1.0f-%1.0f-%1.0ftHora: %1.0f:%1.0f:%1.0f\n', dia(3), dia(2), dia(1), hora);
        fprintf(fid, 'Ciclos Vin(V)\t vm(V)\t am(V)\t Vmax(V)\t Vmin(V)\n');
        fprintf(fid, '%1.0ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft\n', vec_datos(1:6));
        fprintf(fid, '\t Fin(kN)\t vm(kN)\t am(kN)\t Fmax(kN)\t Fmin(kN)\n');
        fprintf(fid, '\t %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft\n', vec_datos(7:11));
        fprintf(fid, '\t CC(kN)\t vmCC(kN)\t amCC(kN)\t CCmax(kN)\t CCmin(kN)\n');
        fprintf(fid, '\t %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft %1.3ft\n', vec_datos(12:end));
    end
end
end
varaux_disparo_2 = cont_ciclos + 0.5;
if disparo ~= 0 && mod(varaux_disparo_2,disparo) == 0 && floor(varaux_disparo_2) -
varaux_disparo_2 == 0 && celula >= prop_disp*maxCelula
    if varaux_disparo ~= varaux_disparo_2 || fp == 1
        digitalWrite(a, Cam, 1);digitalWrite(a, Cam, 0);
        fp = 0;
        varaux_disparo = varaux_disparo_2;
    end
end
end
end
set(handles.text_maxCelula,'String',maxCelula); set(handles.text_minCelula,'String',minCelula);
set(handles.text_vmCelula,'String',vmCelula); set(handles.text_amCelula,'String',amCelula);
set(handles.text_maxV,'String',maxV); set(handles.text_minV,'String',minV);
set(handles.text_vmV,'String',vmV); set(handles.text_amV,'String',amV);
set(handles.text_maxFteo,'String',maxFteo); set(handles.text_minFteo,'String',minFteo);
set(handles.text_vmFteo,'String',vmFteo); set(handles.text_amFteo,'String',amFteo);
pause(1E-20);
end

```



```
if isempty(filename) == 0 && (isempty(varaux_closefile) || varaux_closefile ~= 0)
    varaux_closefile = fclose(fid);
end
```

```
function push_desconectar_arduino_Callback(~, ~, handles)
```

```
% Desconecta Arduino de Matlab para push_finalizar el ensayo completamente.
```

```
global a fin EV1 EV2 EV3
```

```
fin = 1; % Finaliza la lectura de datos.
```

```
digitalWrite(a, EV1, 0);
```

```
digitalWrite(a, EV2, 0);
```

```
digitalWrite(a, EV3, 0);
```

```
% Apaga las 3 electroválvulas.
```

```
delete(a); % Borra la variable de Arduino.
```

```
set(handles.text_estado_arduino,'String','Arduino desconectado'); % Muestra el mensaje de desconexión.
```

```
set(handles.push_exit,'Enable','on');
```

```
set(handles.push_conectar_arduino,'Enable','on');
```

```
set(handles.push_finalizar,'Enable','off');
```

```
function modo_de_carga_SelectionChangeFcn(hObject, ~, handles)
```

```
% Selección de uno de los cuatro métodos de funcionamiento del banco:
```

```
% colocación de la probeta, precarga, ciclo de carga y descarga.
```

```
global tipo_carga
```

```
if (hObject == handles.colocacion)
```

```
    tipo_carga = 'colocacion';
```

```
    set(handles.text_vmr,'String','');
```

```
    set(handles.text_vmr,'FontSize',13.33);
```

```
    set(handles.edit_vmr,'Enable','off');
```

```
    set(handles.edit_vmr,'String','');
```

```
    set(handles.text_amr,'String','');
```

```
    set(handles.edit_amr,'Enable','off');
```

```
    set(handles.edit_amr,'String','');
```

```
    set(handles.text_frec,'String','');
```

```
    set(handles.edit_frec,'Enable','off');
```

```
    set(handles.edit_frec,'String','');
```

```
    set(handles.push_subir,'Enable','on');
```

```
    set(handles.push_subir,'String','Subir');
```

```
    set(handles.push_stop,'Enable','off');
```

```
    set(handles.push_stop,'String','Stop');
```

```
    set(handles.push_bajar,'Enable','on');
```

```
    set(handles.push_bajar,'String','Bajar');
```

```
    set(handles.colocacion,'Enable','off');
```

```
    set(handles.precarga,'Enable','on');
```

```
    set(handles.carga,'Enable','off');
```

```
    set(handles.descarga,'Enable','on');
```

```
    set(handles.push_finalizar,'Enable','on');
```

```
    set(handles.edit_ciclos_lectura,'Enable','off');
```

```
    set(handles.edit_ciclos_captura,'Enable','off');
```

```
elseif (hObject == handles.precarga)
```

```
    tipo_carga = 'precarga';
```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

set(handles.text_vmr,'String','Valor de precarga');
set(handles.text_vmr,'FontSize',9);
set(handles.edit_vmr,'Enable','on','Visible','on');
set(handles.edit_vmr,'String','');
set(handles.text_vmr_kN,'Visible','on');
set(handles.text_amr,'String','');
set(handles.edit_amr,'Enable','off');
set(handles.edit_amr,'String','');
set(handles.text_frec,'String','');
set(handles.edit_frec,'Enable','off');
set(handles.edit_frec,'String','');
set(handles.push_subir,'Enable','on');
set(handles.push_subir,'String','Precargar');
set(handles.push_stop,'Enable','off');
set(handles.push_stop,'String','');
set(handles.push_bajar,'Enable','off');
set(handles.push_bajar,'String','');
set(handles.colocacion,'Enable','off');
set(handles.precarga,'Enable','off');
set(handles.carga,'Enable','off');
set(handles.descarga,'Enable','on');
set(handles.push_finalizar,'Enable','on');
set(handles.edit_ciclos_lectura,'Enable','off');
set(handles.edit_ciclos_captura,'Enable','off');
elseif (hObject == handles.carga)
    tipo_carga = 'ciclo_carga';
    set(handles.text_vmr,'String','Valor medio');
    set(handles.text_vmr,'FontSize',9);
    set(handles.edit_vmr,'Enable','on');
    %set(handles.edit_vmr,'String',''); %Debemos dejar como valor medio el valor de la precarga
    aplicada.
    set(handles.text_amr,'String','Amplitud');
    set(handles.edit_amr,'Enable','on','Visible','on');
    set(handles.edit_amr,'String','');
    set(handles.text_amr_kN,'Visible','on');
    set(handles.text_frec,'String','Frecuencia');
    set(handles.edit_frec,'Enable','on','Visible','on');
    set(handles.edit_frec,'String','');
    set(handles.text_frec_Hz,'Visible','on');
    set(handles.push_subir,'Enable','off');
    set(handles.push_subir,'String','Iniciar ciclo');
    set(handles.push_stop,'Enable','off');
    set(handles.push_stop,'String','Stop');
    set(handles.push_bajar,'Enable','off');
    set(handles.push_bajar,'String','');
    set(handles.colocacion,'Enable','off');
    set(handles.precarga,'Enable','off');
    set(handles.carga,'Enable','off');
    set(handles.descarga,'Enable','on');
    set(handles.push_finalizar,'Enable','on');
    set(handles.text_ciclos_lectura,'Visible','on');
    set(handles.edit_ciclos_lectura,'Enable','on','Visible','on');
    set(handles.text_ciclos_captura,'Visible','on');
    set(handles.edit_ciclos_captura,'Enable','on','Visible','on');
    set(handles.text_cont_ciclos,'Visible','on');
    set(handles.push_cont_ciclos,'Visible','on');

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```
elseif (hObject == handles.descarga)
    tipo_carga = 'descarga';
    set(handles.text_vmr,'String','');
    set(handles.text_vmr,'FontSize',9);
    set(handles.text_vmr_kN,'Visible','off');
    set(handles.edit_vmr,'Enable','off','Visible','off');
    set(handles.edit_vmr,'String','');
    set(handles.text_amr,'String','');
    set(handles.text_amr_kN,'Visible','off');
    set(handles.edit_amr,'Enable','off','Visible','off');
    set(handles.edit_amr,'String','');
    set(handles.text_frec,'String','');
    set(handles.edit_frec,'Enable','off','Visible','off');
    set(handles.edit_frec,'String','');
    set(handles.text_frec_Hz,'Visible','off');
    set(handles.push_subir,'Enable','off');
    set(handles.push_subir,'String','');
    set(handles.push_stop,'Enable','off');
    set(handles.push_stop,'String','');
    set(handles.push_bajar,'String','Descargar');
    set(handles.push_bajar,'Enable','on');
    set(handles.colocacion,'Enable','off');
    set(handles.precarga,'Enable','off');
    set(handles.carga,'Enable','off');
    set(handles.descarga,'Enable','off');
    set(handles.push_finalizar,'Enable','on');
    set(handles.edit_ciclos_lectura,'Enable','off');
    set(handles.edit_ciclos_captura,'Enable','off');
end
```

```
function push_subir_Callback(~, ~, handles)
```

```
% Correspondiente al botón "push_subir", que será empleado en la colocación de
% la probeta, precarga y ciclo de carga.
```

```
global a EV1 EV2 EV3 estado tipo_carga
```

```
if strcmp(tipo_carga,'colocacion') && (strcmp(estado,'vacío') || strcmp(estado,'inicial'))
    digitalWrite(a, EV1, 1);
    digitalWrite(a, EV2, 0);
    digitalWrite(a, EV3, 0);
    estado = 'subiendo_colocacion';
    set(handles.push_subir,'Enable','off');
    set(handles.push_bajar,'Enable','off');
    set(handles.push_stop,'Enable','on');
elseif strcmp(tipo_carga,'precarga') && (strcmp(estado,'inicial') || strcmp(estado,'vacío'))
    digitalWrite(a, EV1, 0);
    digitalWrite(a, EV2, 1);
    digitalWrite(a, EV3, 0);
    estado = 'precarga';
    set(handles.push_subir,'Enable','off');
    set(handles.push_subir,'String','Precargado');
    set(handles.push_stop,'Enable','off');
    set(handles.carga,'Enable','on');
elseif strcmp(tipo_carga,'ciclo_carga') && (strcmp(estado,'precarga') || strcmp(estado,'pausa_ciclo'))
    digitalWrite(a, EV1, 0);
```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

digitalWrite(a, EV2, 1);
digitalWrite(a, EV3, 0);
estado = 'ciclo_carga';
set(handles.push_subir,'Enable','off');
set(handles.push_stop,'Enable','on');
set(handles.push_cont_ciclos,'Enable','on');
end

function push_bajar_Callback(~, ~, handles)

% Corresponde al botón "push_bajar" que se encargará de push_bajar el cilindro en los
% casos necesarios.

global a EV1 EV2 EV3 estado tipo_carga varaux_var vard

if strcmp(tipo_carga,'colocacion') && (strcmp(estado,'vacío') || strcmp(estado,'inicial'))
    digitalWrite(a, EV1, 0);
    digitalWrite(a, EV2, 0);
    digitalWrite(a, EV3, 1);
    estado = 'bajando_colocacion';
    set(handles.push_stop,'Enable','on');
    set(handles.push_bajar,'Enable','off');
    set(handles.push_subir,'Enable','off');
elseif strcmp(tipo_carga,'descarga')
    digitalWrite(a, EV1, 0);
    digitalWrite(a, EV2, 1);
    digitalWrite(a, EV3, 0);
    estado = 'descarga';
    set(handles.push_bajar,'Enable','off');
    varaux_var = vard;
end

function push_stop_Callback(~, ~, handles)

% Corresponde al botón "push_stop" que se encargará de detener los procesos
% iniciados mediante las sentencias de los botones "push_subir", "push_bajar" y sus
% derivados.

global a EV1 EV2 EV3 estado tipo_carga

if strcmp(tipo_carga,'colocacion') && (strcmp(estado,'subiendo_colocacion') ||
strcmp(estado,'bajando_colocacion'))
    digitalWrite(a, EV1, 0);
    digitalWrite(a, EV2, 0);
    digitalWrite(a, EV3, 0);
    estado = 'inicial';
    set(handles.push_subir,'Enable','on');
    set(handles.push_bajar,'Enable','on');
    set(handles.push_stop,'Enable','off');
elseif strcmp(tipo_carga,'ciclo_carga') && strcmp(estado,'ciclo_carga')
    digitalWrite(a, EV1, 0);
    digitalWrite(a, EV2, 1);
    digitalWrite(a, EV3, 0);
    estado = 'pausa_ciclo';
    set(handles.push_subir,'Enable','on');
    set(handles.push_bajar,'Enable','on');

```

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.





```

    set(handles.push_stop,'Enable','off');
end

function edit_ciclos_captura_Callback(hObject, ~, ~)

global disparo

disparo = str2double(get(hObject,'String'));

function edit_ciclos_captura_CreateFcn(hObject, ~, ~)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function push_cont_ciclos_Callback(~, ~, handles)

% Permite reiniciar el contador de push_cont_ciclos

global cont_ciclos filename fid

cont_ciclos = 0;
set(handles.push_cont_ciclos,'String',cont_ciclos);
if isempty(filename)
else
    fclose(fid);
    fid = fopen(filename,'w');
end

function edit_ciclos_lectura_Callback(hObject, ~, ~)

% push_cont_ciclos necesarios para la escritura de los datos.

global lectura

lectura = str2double(get(hObject,'String'));

function edit_ciclos_lectura_CreateFcn(hObject, ~, ~)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function push_exit_Callback(hObject, ~, ~)

% Correspondiente al botón "push_exit". Obliga su empleo para cerrar la
% aplicación.

close_fcn(hObject);

function close_fcn(hObject,~,~)
if strcmp(get(hObject,'type'),'uicontrol')
    delete(gcf);
end

function edit_vmr_Callback(hObject, ~, ~)

```





% Función que adquiere el valor correspondiente al editable de valor medio.

global vm

vm = str2double(get(hObject,'String'));

function edit\_vmr\_CreateFcn(hObject, ~, ~)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function edit\_amr\_Callback(hObject, ~, ~)

% Función que adquiere el valor correspondiente al editable de amplitud.

global am

am = str2double(get(hObject,'String'));

function edit\_amr\_CreateFcn(hObject, ~, ~)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function edit\_frec\_Callback(hObject, ~, handles)

% Función que adquiere el valor correspondiente al editabel de frecuencia.

% Obligamos a que este campo deba estar relleno para poder iniciar el ciclo

% de carga.

global freq

freq = str2double(get(hObject,'String'));

if strcmp(get(handles.push\_subir,'Enable'),'off') && strcmp(get(handles.push\_stop,'Enable'),'off')

set(handles.push\_subir,'Enable','on');

end

function edit\_frec\_CreateFcn(hObject, ~, ~)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function push\_finalizar\_Callback(~, ~, handles)

% Finalizamos el ensayo, cerrando el archivo word y reiniciando los

% parámetros de la interfaz.

global fid filename a EV1 EV2 EV3 varaux\_closefile v tipo\_carga estado lectura cont\_ciclos

if isempty(filename) == 0

varaux\_closefile = fclose(fid);

end

v = 0;

digitalWrite(a, EV1, 0);

digitalWrite(a, EV2, 0);

digitalWrite(a, EV3, 0);

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



```

set(handles.colocacion,'Value',1);
tipo_carga = 'colocacion';
estado = 'vacío';
set(handles.text_vmr,'String','');
set(handles.text_vmr,'FontSize',13.33);
set(handles.edit_vmr,'Enable','off');
set(handles.edit_vmr,'String','');
set(handles.text_amr,'String','');
set(handles.edit_amr,'Enable','off');
set(handles.edit_amr,'String','');
set(handles.text_frec,'String','');
set(handles.edit_frec,'Enable','off');
set(handles.edit_frec,'String','');
set(handles.edit_ciclos_lectura,'String',lectura);
set(handles.push_conectar_arduino,'Enable','off');
set(handles.push_desconectar_arduino,'Enable','on');
set(handles.push_subir,'Enable','on');
set(handles.push_subir,'String','Subir cilindro');
set(handles.push_stop,'Enable','off');
set(handles.push_stop,'String','Stop');
set(handles.push_bajar,'Enable','on');
set(handles.push_bajar,'String','Bajar');
set(handles.push_cont_ciclos,'Enable','off');
set(handles.edit_ciclos_lectura,'Enable','off');
set(handles.edit_ciclos_captura,'Enable','off');
set(handles.colocacion,'Enable','off');
set(handles.precarga,'Enable','on');
set(handles.carga,'Enable','off');
set(handles.push_finalizar,'Enable','off');
set(handles.descarga,'Enable','off');
cont_ciclos = 0;
set(handles.push_cont_ciclos,'String',cont_ciclos);

```

```
function fondo_escala_Callback(~, ~, ~)
```

```

function fondo_escala_CreateFcn(hObject, ~, ~)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```
function push_fondo_escala_Callback(~, ~, ~)
```

```

helpdlg('El fondo de escala aplicado debe ser la mitad del aplicado en la centralita del banco, debido a la diferencia entre las tensiones permitidas por Labjack y Arduino.','');

```



## ANEXO VI: FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA

Trabajo Fin de Grado: *Implementación y Puesta en Marcha de un Sistema Hidroneumático para Estudio en Crecimiento de Grietas en Probetas Planas Empleando un Puente de Carga Biaxial.*

Grado en Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Álvaro Garzón Casado. Universidad de Jaén. Junio 2015.



## ANEXO VI: FUENTES Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.testresources.net/test-machines/902-family>
- [2] Anderson, T.L. (2005) *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3ª edición, Boca Raton (EE.UU.), CRC Press.
- [3] <http://www.xtec.cat/~cgarci38/ceta/tecnologia/arcos.htm>
- [4] <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/Tema08.htm>
- [5] <http://averline.blogspot.com.es/2008/12/la-gran-inundacin-de-melaza-de-1919.html>
- [6] <http://turbomaquinastermicasct3412.blogspot.com.es/p/compresores-axiales.html>
- [7] Akesson, B. (2008) *Understanding Bridge Collapses: From the Horizon of the Structural Engineer*, Boca Raton (EE.UU.), CRC Press.
- [8] Withey, P.A. (1997) Fatigue failure of the de Havilland comet I, *Engineering Failure Analysis*, 4(2), pp. 147-54
- [9] [http://www.tech.plym.ac.uk/sme/interactive\\_resources/tutorials/FailureCases/images/CM9ALYU.jpg](http://www.tech.plym.ac.uk/sme/interactive_resources/tutorials/FailureCases/images/CM9ALYU.jpg)
- [10] <http://www.scienzadellecostruzioni-segreteria.it/passato.php>
- [11] Dally, J.W. y Riley, W.F (2005) *Experimental stress analysis*, 4ª edición, Knoxville (EE.UU.), College House Enterprises.
- [12] Sutton, M.A., Orteu, J.J. y Schreier, H.W. (2009) *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*, Nueva York (EE.UU.), Springer.
- [13] López Alba, E., Felipe Sesé, L. A., Vasco Olmo, J. M. y Díaz Garrido, F. A. (2013) Aplicaciones industriales de técnicas ópticas de campo completo para la medida de tensiones y deformaciones en elementos de máquinas, *DYNA*, 80(101)
- [14] <http://www.ni.com/tutorial/7130/es/>
- [15] [http://es.wikipedia.org/wiki/Roseta\\_de\\_deformaci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Roseta_de_deformaci%C3%B3n)
- [16] Arduino User's Guide, <http://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Tutorial/PWM>



- [17] <https://tellesyaretzi.wordpress.com/2014/12/01/practica-6-modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>
- [18] MATLAB Documentation
- [19] American Society for Testing and Materials, “Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates,” E647-95, pp. 578–614, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania (1995).

