

CAPÍTULO VI:

LA FUERZA Y SU MEDIDA

6.1.-INTRODUCCIÓN.-

El presente capítulo está dedicado a todo lo relacionado con la calibración de instrumentos de medida de fuerza y máquinas de ensayo de materiales, dos de los servicios que se prestarán en el Laboratorio de Fuerza cuya puesta en marcha es objeto del presente Proyecto Fin de Carrera.

Para la calibración de instrumentos de medida de fuerza se han elaborado dos procedimientos específicos y para la calibración de máquinas de ensayo de materiales otro. La justificación así como los aspectos más relevantes de los mismos, serán tratados en el presente capítulo. De la misma forma existen diversas hojas de cálculo en Microsoft Excel, que realizan los cálculos y obtienen los resultados de las calibraciones en la forma que se exponen en dichos procedimientos.

Los servicios que se proporcionarán en dicho Laboratorio giran en torno al Sistema de Calibración de Fuerza; se trata de una cadena de medida que se describirá en el presente capítulo y que ha generado otro procedimiento específico, de especial relevancia como veremos, denominado *PEAM XX: Caracterización del Sistema de Calibración de Fuerza* cuyo objetivo es la obtención de una incertidumbre global del sistema (*Capacidad Óptima de Medida*) que será considerada como incertidumbre patrón en todas las calibraciones que con él se realicen. Asimismo se han elaborado diversas hojas de cálculo que facilitan la obtención de los resultados de los cálculos expuestos en dicho procedimiento.

En general, el propósito de este capítulo es exponer o remarcar todas las consideraciones relevantes a:

- Explicar la trazabilidad de la magnitud fuerza.
- Conocer de manera general la normatividad y requisitos técnicos existentes en la magnitud fuerza.
- Clasificación de Instrumentos de medida de fuerza patrones según la norma UNE-7-474-95/3.
- Reconocimiento de los patrones de fuerza.
- Reconocimiento de equipos auxiliares.

- Clasificación y tipología de máquinas de ensayo en base a UNE-EN 12390-4 y UNE-EN ISO 7500-1:2000.

Proporcionamos el siguiente esquema en el que se indican los servicios que se proporcionarán en el Laboratorio de Fuerza y los procedimientos específicos generados asociados a los mismos:

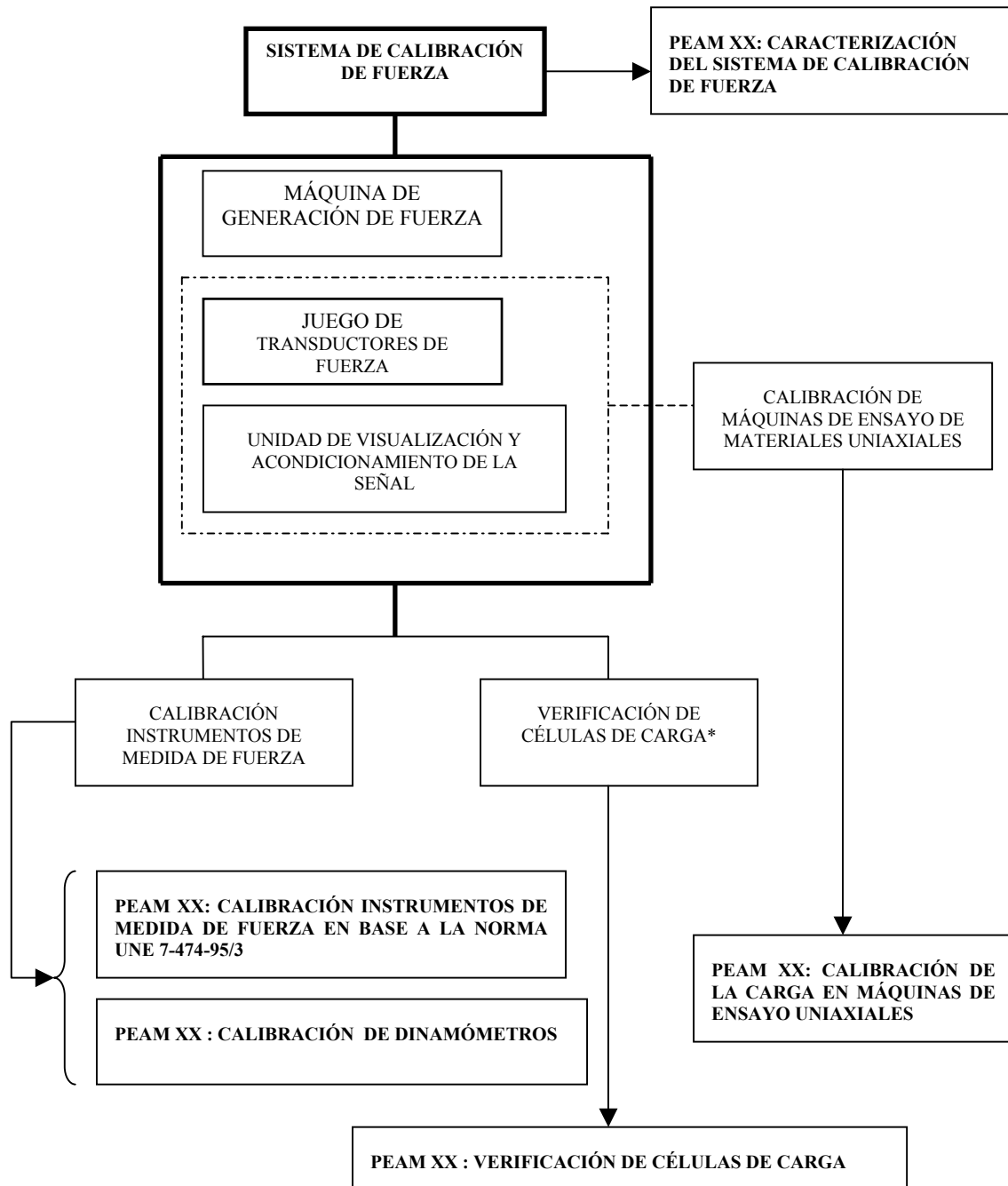


Figura 18 :Esquema de Los Procedimientos específicos elaborados Sistema de Calibración de Fuerza

Como se observa, en el gráfico se incluye un servicio: la verificación de Células de Carga, que no hemos comentado en la presente introducción y es que como posteriormente se justificará se ha incluido en un capítulo independiente.

6.2.-MAGNITUD FUERZA.-

Desde el punto de vista de la física estática, se define como fuerza, aquella acción que, ejercida sobre un cuerpo, produce sobre él una deformación, que será tanto más grande cuanto mayor sea la fuerza causante. El valor numérico correspondiente a su intensidad, que en el sistema internacional corresponde al Newton (N), será la primera información precisa para su conocimiento. Ahora bien la fuerza como es sabido, es una magnitud vectorial, con lo que la misma fuerza aplicada sobre un mismo objeto producirá efectos distintos en función de la dirección sobre la que la fuerza actúe. Así las deformaciones pueden serlo por tracción, compresión, flexión, torsión o cizalladura (fuerzas tangenciales).

La deformación es debida a que las partículas del material se desplazan hasta una posición que permita establecer un equilibrio entre las fuerzas interiores del material y la aplicada exteriormente, y se mantendrá mientras exista la fuerza actuante externa. En el momento en que la fuerza deformadora cesa, las fuerzas interiores tienden a restituir la posición inicial, pudiendo suceder que el cuerpo deformado recupere completamente su forma primitiva, circunstancia que acontecerá para materiales perfectamente elásticos, produciéndose una deformación permanente en el caso de materiales perfectamente inelásticos.

El hecho que un material se comporte como elástico depende no solamente de las características del material sino también de la magnitud de la deformación, pudiendo considerar por tanto que, para pequeñas deformaciones, todos los cuerpos son elásticos.

Es esta propiedad de los materiales, constatada por la llamada Ley de Hooke, junto con la variación de la resistencia eléctrica de los conductores en base a una deformación mecánica elástica, expresada por Lord Kelvin, constituye el punto de partida que posibilita la medida de la fuerza, tal y como se vio en el Capítulo IV.

Por lo que se refiere a la tipología de las fuerzas presentes en el entorno industrial, y por tanto, susceptibles de ser medidas, podemos considerar que tienen, básicamente, un comportamiento dinámico, ya que todos los sistemas mecánicos evolucionan con el

tiempo. Sin embargo, en función de la velocidad de variación a la que están sometidas, las posibles medidas de fuerzas serán.

- Estáticas: entenderemos por fuerzas estáticas las referidas a soportes o elementos resistentes sometidos a cargas fijas.
- Mixtas: las referidas a soportes o elementos resistentes sometidos a cargas de variación rápida.
- Dinámicas: las realizadas sobre acciones de variación rápida, como por ejemplo los fenómenos de vibración o de impacto.

En el presente capítulo nos referiremos siempre a fuerzas estáticas, pues no existen muchas fuentes de la calibración dinámica de fuerza y ciertamente de ninguna en la fuerza y las gamas de frecuencia medidas por la mayoría de transductores dinámicos de fuerza comercialmente disponibles.

6.3.-INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE FUERZA.-

Un instrumento de medida de fuerza se compone de un transductor y de una instrumentación asociada.

El transductor¹⁰ debe recibir la fuerza que se va a medir de forma que un cierto cambio resultante en el elemento sensor del mismo, será medido por la instrumentación asociada. La instrumentación puede accionar el transductor de una cierta manera y también puede procesar la salida del transductor antes de que se muestre en un indicador que se leerá por el usuario. Un transductor es como sabemos, un dispositivo que recibe un estímulo físico y lo cambia en otra cantidad física medible con una relación conocida.

En definitiva, para los procedimientos específicos de calibración elaborados por el alumno (concretamente dos) se entenderá por instrumento de medida de fuerza como el conjunto que comprende desde el transductor de fuerza hasta el dispositivo indicador (incluido los cables de conexión eléctrica, los dispositivos de sujeción y aplicación de carga, etc).

El indicador puede estar integrado en el mismo instrumento, como en el caso de los anillos mecánicos que incorporan un comparador de reloj (dinamómetros de comparador mecánicos) como digitales, o separado del transductor, caso de los instrumentos eléctricos (transductores de fuerza basados en galgas extensiométricas) que

¹⁰ Para muchos tipos de sistema de medida de fuerzas, el término *célula de carga* es el que se usa comúnmente en lugar de *transductor de fuerza*, aunque como se verá en el próximo capítulo no son términos equivalentes

suelen disponer de un puente de medida electrónico (sistema de amplificación, tratamiento e indicación de la señal) externo al propio sensor de fuerza.

Por dispositivo de visualización o de indicación del instrumento de medida de fuerza, entendemos el conjunto de los componentes que permiten visualizar el valor de la magnitud de fuerza o un valor asociado a esta

El valor indicado a la salida del instrumento de medida de fuerza en cuestión, puede estar expresado en unidades de fuerza o en otras unidades tales como la tensión a la salida del puente de Wheatstone (mV/V), concretamente:

- En los dinamómetros mecánicos, en los que el dispositivo de visualización está integrado en el propio instrumento sensor, dicha indicación está proporcionada normalmente, en unidades de Fuerza.
- Sin embargo, en los dinamómetros electrónicos, como los transductores de fuerza basados en galgas extensiométricas, el puente de medida utilizado para la visualización de la señal puede permitir la visualización de esta bien en unidades de tensión (mV/V) recibida directamente de la tensión a la salida del puente de Wheatstone, o bien en unidades de fuerza (KN) procesando dicha tensión y convirtiéndola en unidades de fuerza simplemente en base a la recta de comportamiento del equipo.

6.3.1.-Procedimientos de calibración de instrumentos de medida de fuerza.-

Como sabemos, para la elaboración de los procedimientos de calibración, es importante la consulta de bibliografía, especialmente los procedimientos de calibración elaborados por el CEM, así como contemplar la posible normativa referente a la calibración de los equipos en cuestión. En el caso que nos ocupa de instrumentos de medida de fuerza la única y muy importante norma a tener en consideración es la norma **UNE 7-474-95 parte 3: Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza (carga) para la verificación de las máquinas de ensayo uniaxial.**

En ella se definen las condiciones y la forma de ejecución de los ensayos, de forma que de los resultados de las medidas efectuadas, puedan calcularse los valores de los diferentes errores que caracterizan al instrumento de medida de fuerza objeto de la calibración posibilitando así, su *clasificación* según la mencionada norma UNE 7-474-95/3, en base a la tabla que a continuación se adjunta:

Clase	Error relativo del instrumento de medida de fuerza, %					Fuerza de calibración	Resultado de medida
	de repetibilidad		de Interpolación	de cero	de reversibilidad	Incertidumbre (W_{mcf})	Incert. calibrac min-max %
	b	b'	f_c	f_0	u		
00	0,05	0,03	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	0,01	$(W_{mcf})-0,06$
0,5	0,1	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	0,02	0,06-0,12
1	0,2	0,1	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	0,3	0,05	0,12-0,24
2	0,4	0,2	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	0,5	0,1	0,24-0,45

Hubiese sido posible la elaboración de un solo procedimiento de calibración que englobase la calibración de todos los instrumentos de medida de fuerza, cualesquiera que fuese su tipología (dinamómetros de comparador mecánicos o electrónicos) tal y como hace el CEM, sin embargo, el alumno, de cara a mejorar la operatividad del laboratorio decidió elaborar dos procedimientos específicos, concretamente son los siguientes:

- Uno de calibración de instrumentos de medida de fuerza en base a la Norma UNE 7-474-95/3, realizado conforme a las prescripciones y restricciones contempladas en la misma, posibilitando así la clasificación del instrumento de medida de fuerza.
- Otro realizado en base a criterios metroológicos generales, definiendo un procedimiento de calibración y unos cálculos de incertidumbres ligeramente distintos al del procedimiento anterior.

El motivo de esta división no radica en la tipología del instrumento de medida de fuerzas en sí, puesto que ambos están elaborados permitiendo la calibración de cualquier tipo de instrumento de medida de fuerzas (mecánicos o electrónicos), sino en el uso que se le dará al mismo por parte del cliente, así como de las características metroológicas del mismo. Esto es así ya que la Norma UNE 7-474-95/3 como su nombre indica, se refiere a la calibración de instrumentos de medida de fuerzas, que posteriormente puedan o vayan a ser utilizados como equipo de calibración (instrumento patrón) de máquinas de ensayo de materiales uniaxiales. Sin embargo, esta es una característica muy específica de un instrumento de medida de fuerza, especialmente útil para laboratorios de calibración (como es el caso del laboratorio en el que se desarrolla el presente Proyecto Fin de

Carrera, entre cuyas actividades se desea incluir la realización de dichas calibraciones) y que se escapa del ámbito de la mayor parte de usuarios.

Por tanto, se ha elaborado otro procedimiento que, respetando las líneas generales de la mencionada norma, no posee las restricciones estipuladas en la misma, y en la que tanto el cálculo de incertidumbres como el resto de operaciones e instrucciones se simplifican.

Concretamente, una de las diferencias fundamentales entre ambos procedimientos es que para el caso de instrumentos de medida de fuerza que posteriormente vayan a ser utilizados como equipo de calibración para máquinas de ensayo de materiales, o en general aquellos instrumentos de más elevadas prestaciones (dinamómetros electrónicos), el número de puntos de calibración es más elevado delimitando un número mínimo de 8 puntos de calibración, siendo además recomendable que la calibración proporcione la relación entre la fuerza aplicada al elemento sensor y cada una de las tensiones correspondientes indicadas por el equipo, tal y como se muestra en la siguiente tabla que corresponde a los resultados de la calibración de un instrumento de medida de fuerza con puente de medida electrónico de 20 KN de alcance máximo y una sensibilidad de 2 mV/V:

Fuerza KN	Indicaciones (mV/V)
2	0,20383
4	0,40773
6	0,61175
8	0,81566
10	1,01938
12	1,22364
14	1,42772
16	1,63178
18	1,83579
20	2,03984

La delimitación de 8 como número mínimo de puntos de calibración responde a que este tipo de instrumentos pueden ser utilizados en todo su rango de medida, para lo cual debe ser calculada una curva de ajuste, utilizando para ello el método de los mínimos cuadrados, de, por ejemplo, grado 3, de la forma:

$$X_a = f(F),$$

$$X_a = A + B \cdot F + C \cdot F^2 + D \cdot F^3$$

donde:

- F: son los valores de fuerza aplicada (puntos de calibración) en KN
- X_a : será el valor de la deformación en las unidades en las que se haya calibrado el instrumento, por ejemplo mV/V
- A, B, C y D: son los coeficientes del polinomio de ajuste

El cálculo de esta curva posibilitará la determinación del error relativo de interpolación (f_c %) influyente en la clasificación según norma UNE 7-474-95/3 del instrumento y su utilidad para el usuario estriba, como decimos, en permitirle la utilización del instrumento en todo su rango de medida, en base a la predicción de valores que le proporciona la curva.

En este sentido conviene realizar una aclaración:

El término utilizado, tanto en la norma UNE que acabamos de mencionar como en otro tipo de documentos referentes a la calibración de equipos, es *Polinomio de Interpolación*, siendo el uso de este término matemático incorrecto para definir a una curva de ajuste de grado "n", por ejemplo n=3, a partir de una nube de puntos, por ejemplo m=10, calculada por el método de los mínimos cuadrados, se trata por tanto de un análisis de regresión.

La interpolación polinómica de una serie de "m" puntos se refiere al cálculo de un polinomio de grado "m-1" que posee la característica de contener todos los puntos utilizados para su construcción.

Sin embargo, la curva de ajuste calculada por el método de los mínimos cuadrados no tiene que pasar exactamente por los puntos en base a los cuales se ha construido sino que, como su nombre indica, es la curva que mejor los ajusta, su misión es por tanto realizar una predicción de valores para aquellos puntos comprendidos entre el máximo y el mínimo de los valores que constituyen la variable independiente.

Por tanto se puede definir un *error en el ajuste* calculado como la diferencia entre el valor ajustado de un punto (el proporcionado por la curva) y el valor real. Este error expresado en tanto % sobre el valor de la medida es el que la Norma UNE 7-474-95/3 denomina como *error de interpolación*, al que como decimos debería llamar, error del ajuste.

6.4.-SISTEMAS DE CALIBRACIÓN DE FUERZA.-

6.4.1.-Patrones para la calibración de Fuerza.-

Para la calibración de instrumentos de medida de medida de fuerza existen, desde un punto de vista general, dos tipos de patrones: primarios y secundarios:

- Los patrones primarios de medida de fuerza son máquinas cuya incertidumbre se puede verificar con principios físicos consiguiendo trazabilidad directamente a las unidades fundamentales del Sistema Internacional (masa en este caso) .

- Los patrones secundarios son máquinas que pueden reproducir de forma fidedigna fuerzas que se pueden comparar a los patrones primarios mediante el uso de un patrón que sea un transductor de fuerza calibrado, por ejemplo un transductor de transferencia.

Existen varios tipos de máquinas patrones de fuerza que posibilitan la calibración en fuerza, a saber:

- Máquinas de fuerza de carga directa o máquina de pesos muertos:

Su principio de funcionamiento está basado en la acción directa de las masas en el campo gravitatorio, es un sistema que por medio de masas suspendidas aplica pesos directamente sin la intervención de algún mecanismo de amplificación, como una palanca o un multiplicador hidráulico. Este método, por estar basado en leyes básicas de la física, genera la más alta exactitud en la medición de fuerza. Este patrón sirve como primer eslabón en la cadena de trazabilidad y es utilizado en la calibración de dispositivos elásticos de alta exactitud para la medición de fuerza como son los transductores de fuerza basados en galgas extensiométricas, que a su vez son utilizados como patrones de referencia o de transferencia.

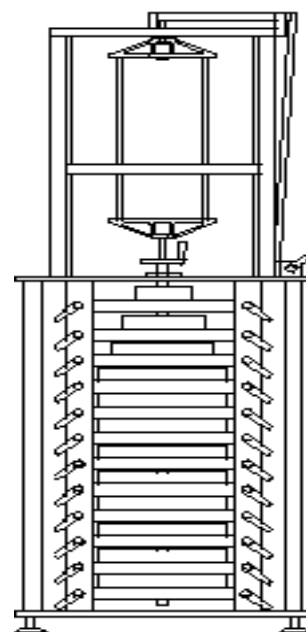


Figura 19: Esquema de una máquina de Pesos Muertos

- Máquinas de fuerza de amplificación mecánica

Su principio de funcionamiento está basado en la amplificación de la acción de las masas en el campo gravitatorio, a través de sistemas de palancas mecánicas.

- Máquinas de fuerza de amplificación hidráulica

Su principio de funcionamiento está basado en la amplificación de la acción de las masas en el campo gravitatorio, a través de sistemas pistón - cilindro.

- Máquinas de fuerza por comparación

Su principio consiste en comparar el instrumento de medida de fuerza a calibrar, con un instrumento de medida de fuerza de referencia, compuesto por un transductor, situados ambos en serie y un dispositivo indicador de referencia.

Sus características, proporcionadas en forma de tabla, son las siguientes:

Tipo de máquina	Teoría de operación	Incertidumbre alcanzable ±%	Categoría
Carga directa/ Pesos Muertos	Una masa conocida se suspende en el campo gravitacional de la tierra generando así una fuerza	0,001	Primario o secundario
Amplificación hidráulica	Una máquina pequeña de pesos muertos aplica una fuerza a un conjunto pistón-cilindro y la presión generada así se aplica a un montaje más grande de pistón-cilindro	0,02	Secundario
Amplificación mecánica (palanca)	Una máquina pequeña de pesos muertos aplica una fuerza a un sistema de las palancas que amplifican la fuerza	0,02	Secundario
Máquinas por comparación/ Transductor de fuerza de referencia	Un patrón de transferencia de fuerza se pone en serie con el instrumento a calibrar (típicamente en una máquina de ensayos de materiales)	0,05	Secundario

6.4.2.-Descripción del sistema de calibración de fuerza del Laboratorio.-

6.4.2.1.-Descripción de la Máquina de Generación de Fuerza.-

El Laboratorio cuenta con una máquina para la calibración de fuerza con un alcance de 500 KN tanto en sentido de cargas a compresión como a tracción.

Fundamentalmente la máquina puede dividirse en tres partes, a saber:

- Bancada: aloja en su interior el conjunto actuador electromecánico, compuesto generalmente por: motor, reductor, poleas de transmisión, husillos a bolas y tuercas. Sobre la bancada se sustenta el marco de ensayos.
- Marco de ensayos: se trata de un marco de carga de alta rigidez con dos columnas guía en acero cromado y doble husillo. El puente móvil lleva los taladros y accesorios para instalar alguna de las células de carga de control de las que está provista la máquina. El puente móvil aloja las tuercas de los husillos, de forma que es accionado por el mismo y guiado, como hemos dicho, por las columnas-guía.
- Actuador: el sistema de carga de la máquina es electromecánico mediante doble husillo a bolas de aplicación universal (de doble efecto: tracción/compresión). El

accionamiento se controla a través de un motor de corriente continua, que proporciona el par adecuado a través de un sistema de reducción. El usuario puede seleccionar rangos diferentes tanto de recorrido como de velocidad, para ejecuciones a medida.

En cuanto a su principio de accionamiento, como decimos, la carga es aplicada mediante un sistema de doble husillo en el marco de ensayos de la máquina, que junto a las columnas de la máquina, proporcionan una alta rigidez al conjunto. El puente inferior móvil es accionado por el husillo a bolas y guiado en su movimiento por las columnas laterales. El recorrido del puente viene prefijado por el recorrido del husillo.

Los **husillos** son de doble efecto y se controlan por motor de corriente continua, incorporando un encoder óptico para la medida de la posición. La velocidad de ensayo en control por recorrido se gobierna, como decimos, de forma digital, mediante un codificador óptico incremental situado en el eje del motor, con lo que se regula con muy alta precisión el movimiento del mismo, al multiplicar por la relación de reducción completa del sistema.

La transmisión se efectúa al sistema de husillos por medio de un sistema de polea que transmite la potencia a cada husillo desde la salida del conjunto motor-reductor.

Las máquinas, con sistema electromecánico de generación de carga se caracterizan frente a los sistemas de tipo hidráulico, por:

- Tener una *alta estabilidad* (fundamental a velocidades de carga lentas o en *ensayos de larga duración*),
- Ser *capaces de mantener la carga* en sus valores especificados durante intervalos suficientemente largos, *con errores menores del 0,1%* de la carga aplicada
- Tener un *mantenimiento mínimo* (no precisan cambio de aceite, de filtros o de juntas),
- No requerir excesivo espacio ni una instalación hidráulica (que pueda suponer merma de espacio, ruidos, etc.),
- *No tener fugas* de aceite, etc, ni requerir elementos de refrigeración costosos y con el mantenimiento subsiguiente del mismo.

Además, el desplazamiento del sistema de carga permite la aplicación de ésta **sin impacto**, de forma continua en un tiempo dado, no dependiendo del estado de limpieza

que afecta a la actuación de correderas de electroválvulas o servoválvulas en sistemas hidráulicos.

El mantenimiento de un escalón de carga dado con alta estabilidad en el tiempo se consigue con mayor facilidad y precisión que en los sistemas hidráulicos, por el propio servocontrolador y la propia irreversibilidad del sistema de transmisión. Las máquinas de tipo electromecánico por tanto, poseen un excelente comportamiento en ensayos de larga duración, donde es necesario mantener la carga o la posición durante mucho tiempo en un nivel determinado con alta estabilidad.

Esta máquina de generación de fuerza con sistema electromecánico de aplicación de carga, incorpora como decimos tres células de carga a modo de células de control, concretamente con unos alcances de 50, 200 y 500 KN. Para permitir el funcionamiento de la misma, alguna de estas células de control, deberá estar instalada en el puente móvil de la máquina, mediante el uso de los accesorios adecuados, pues estas son utilizadas por el sistema de control automático de la misma para su funcionamiento, concretamente la señal de estas células es la que el sistema utiliza para realizar las paradas por alarma programadas en fuerza. Por la construcción y el diseño de la máquina de fuerza, será imprescindible el conectar alguna de las tres células de control existentes, en función de la fuerza máxima necesaria, no teniendo esta célula ninguna influencia en el resultado de las medidas, pues la señal patrón será la proporcionada por alguno de *transductores de fuerza patrones* de los que se dispone.

Este sistema de medida de fuerza que utilizan las máquinas por comparación, proporciona una medida de la fuerza más precisa que los captadores de presión (manómetros) empleados en los sistemas hidráulicos, cuya medida está afectada por la temperatura del aceite, las oscilaciones locales de presión por el flujo del aceite y los rozamientos producidos en el cilindro hidráulico de carga.

6.4.2.2.-Transductores de fuerza de referencia e indicador asociado.-

Como decimos se trata de una máquina de fuerza del tipo *por comparación*, cuyo principio consiste, como sabemos, en comparar la señal del instrumento de medida de fuerza a calibrar, con la de un instrumento de medida de fuerza de referencia, compuesto por un transductor, situados ambos en serie y un dispositivo indicador de referencia.

Concretamente, el laboratorio cuenta para ello con un juego de 5 transductores de fuerza de referencia¹¹, con alcances máximos distribuidos a lo largo del dicho rango, concretamente de 500, 200, 100, 50 y 20 KN respectivamente, todos de clase 00 excepto el primero de ellos de clase 0,5, clasificación realizada en base a la norma *UNE 7-474-95 parte 3*, norma bajo la que se realiza la calibración de estos transductores puesto que como posteriormente se comentará, son utilizados como instrumento patrón en las calibraciones de máquinas de ensayo de materiales uniaxiales, realizadas “*in situ*”.



Figura 20: Transductor de Fuerza de referencia del Laboratorio

La calibración de estos transductores de fuerza patrones se realiza en un patrón primario de fuerza, por tanto, en un laboratorio de referencia, concretamente en una máquina Nacional de Fuerza, máquina de pesos muertos, en las instalaciones del CEM, obteniendo así sus curvas de calibración, con lo que dichos transductores serán los patrones

de referencia del laboratorio, en cuanto a la calibración de fuerza se refiere.

Cada uno de estos transductores de fuerza se acopla como parte integrante de la máquina, y son ellos los que proporcionan la señal patrón durante las calibraciones de instrumentos de medida de fuerza realizados en la máquina en cuestión, por lo que se trata, por tanto, de patrones de trabajo a la vez que patrones de referencia.

Para el acoplamiento de cada uno de estos transductores de referencia en la máquina, o más correctamente, para el conjunto formado por célula de control (escogida de entre las tres existentes), transductor de fuerza patrón (escogido de entre los 5 existentes) e instrumento de medida de fuerzas a calibrar, se hace necesario la uso de diversos útiles tales como platos centradores (para disminuir el efecto de la no axialidad de las cargas en sentido de compresión) rótulas de tracción (en sentido de cargas a tracción) machones reductores, adaptadores macho-hembra, ganchos, etc., todo ello teniendo en cuenta los tipos y diámetros de rosca de cada unos de los elementos a unir.

Observemos para ello, el plano de estos transductores de fuerza:

¹¹ Se trata de transductores de fuerza electrónicos basados en galgas extensiométricas cuyo principio físico de funcionamiento fue descrito el apartado 4.5 del capítulo anterior

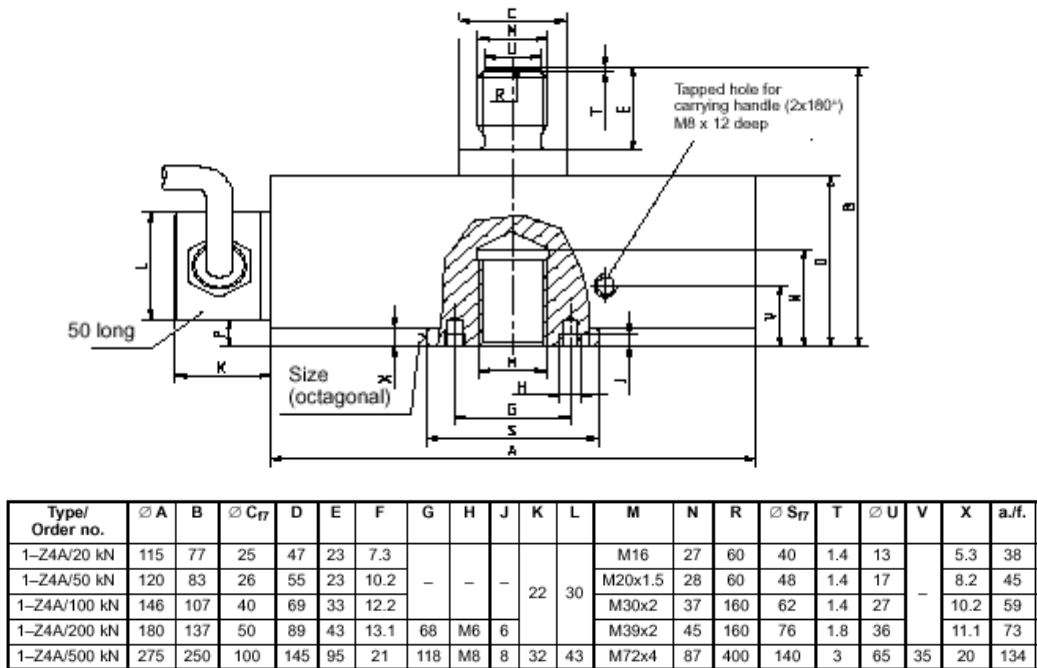


Figura 21: Plano y dimensiones de los Transductores de Fuerza del referencia del Laboratorio

La señal de cada uno de esos transductores de fuerza es acondicionada por un dispositivo de amplificación, tratamiento y visualización de la señal.

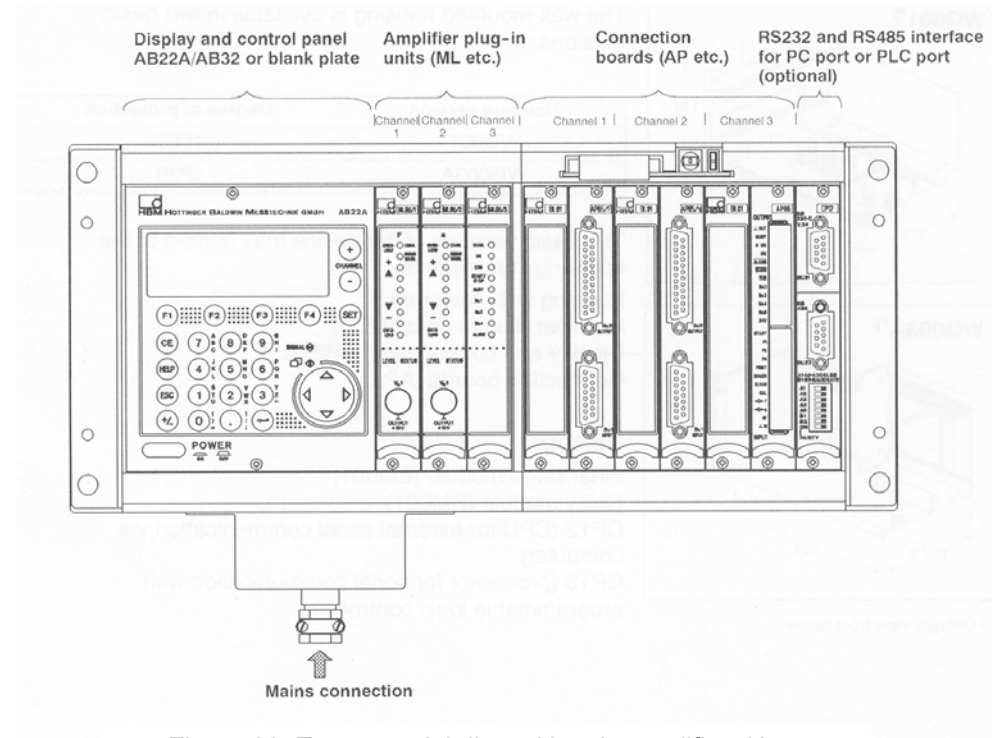


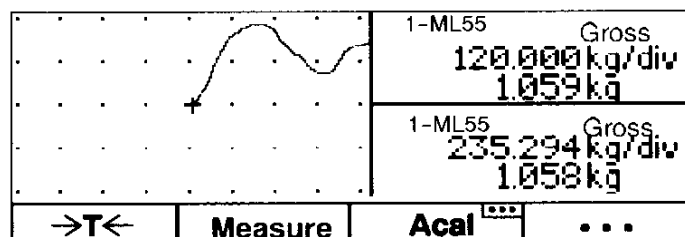
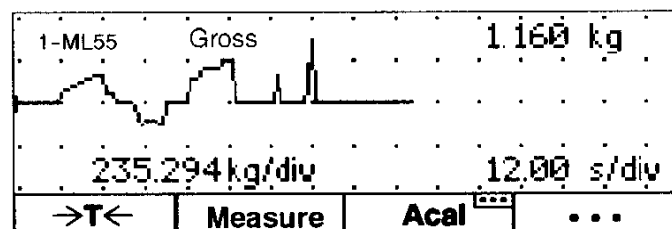
Figura 22: Esquema del dispositivo de amplificación y visualización de la señal de los transductores de fuerza

Se trata de un sistema de construcción modular (concretamente dispone de dos canales a los que deben ser conectados los transductores de fuerza patrón y mensurando). Posee un microprocesador que convierte señales analógicas en digitales minimizando así inconvenientes como la deriva en el tiempo, la deriva por temperatura, flexibilidad limitada o la excesiva complejidad de los circuitos.

Por sí mismo, el dispositivo dispone de funciones, como son:

- Disponibilidad de señales de alarma.
- Almacenamiento de Valores Limites.
- Cálculo de valores medios y congelación de la indicación.
- Representaciones gráficas de la señal.
- Definición de usuarios y contraseñas de Protección.

entre otras, funciones que permiten a este dispositivo ser utilizado, en conjunción con cada uno de los 5 transductores de fuerza disponibles, constituir un equipo de calibración fácilmente transportable que permite su utilización en las calibraciones en fuerza realizadas “in situ”.



Posee un puerto RS232C que permite su conexión con una tarjeta de control. Esta tarjeta de control se encuentra instalada en un ordenador personal con software informático específico instalado que permite el control de la máquina.

6.4.2.3.-Software de Control, medida y registro de datos del sistema.-

Este software, es un sistema diseñado para la calibración automática de transductores de fuerza sobre maquinas estáticas, posee todas las funciones características que para este tipo de sistemas informáticos, ya fueron mencionadas en el capítulo anterior, como son, entre otras:

- Disponer del control directo de todas las funciones de la maquina desde un PC
- Realizar adquisiciones de datos.
- Personalizar los resultados de las calibraciones.
- Configurar el informe de suministrado por el sistema (resultados a presentar, gráficos, etc..)
- Incorporar niveles de acceso por usuarios, a las distintas partes de la aplicación.
- Memorización de máximos de fuerza.
- Generación de señales de paro por sobrecarga.
- Ajuste de niveles de alarma de fuerzas en toda la escala de medida, con visualización y accionamiento de dispositivos externos mediante relé.
- Salidas analógicas de señal.
- Programación automática de las secuencias de cargas a realizar durante la calibración, mediante software específico.

Este sistema además, trabaja bajo el entorno Windows, con lo que se añaden todas las ventajas de dicho entorno a todas las operaciones que el usuario puede realizar con el programa:

- Posibilidad de trabajo al mismo tiempo que otras aplicaciones.
- Utilización de los recursos del sistema Windows (impresoras, fuentes de texto, etc).
- Entorno gráfico de trabajo.
- etc.

Básicamente el sistema consta de cinco módulos o programas relacionados entre sí, cada uno de ellos con una función distinta:

- **Módulo de Configuración:**

El modulo de configuración, permite al usuario adaptar las características generales del resto de los programas, a sus necesidades particulares (resolución de las variables de la maquina, unidades de medida, denominación de cada una de las variables,

etc). Al módulo de configuración de parámetros, solo tienen acceso los usuarios con nivel de privilegios máximo. De esta manera se evitan manipulaciones no deseadas que pueden afectar al correcto funcionamiento de la máquina de ensayos.

▪ Control de ensayos:

El programa de control da al usuario el acceso directo a todas las funciones de la máquina, la posibilidad de realizar calibraciones de forma automática, etc.

Este panel de control de ensayos, es el módulo más importante de los que componen el sistema, es el que nos va a permitir el control directo de la máquina de ensayos desde el PC. Esto incluye, desde un control manual simple, hasta la automatización de calibraciones.

El módulo de control de ensayos tiene, por tanto, dos modos de funcionamiento :

- Un modo ‘calibración’, a través del cual el operador realiza las calibraciones y almacena los resultados de forma automática.
- Y un modo ‘manual’, a través del cual el operador controla directamente todos los elementos de la máquina de ensayos (estado del conjunto actuador, control del movimiento, etc.).

De forma general, el operador dispone de las siguientes características :

- Visualización en tiempo real de las lecturas tanto del transductor patrón como del calibrando.
- Visualizar el estado del conjunto actuador.
- Visualización de los valores obtenidos durante la calibración, mientras esta se ejecuta.
- Completa identificación de los elementos que intervienen en la calibración.
- Personalización por parte del usuario del proceso completo de la calibración .

Uno de los aspectos más importantes de este módulo, son los parámetros de la calibración, entre los cuales se encuentra el *rango de aproximación al escalón* o la unidad de trabajo, cuya configuración condicionará la exactitud global del sistema, tal y como se verá en el apartado 6.5.3.4.

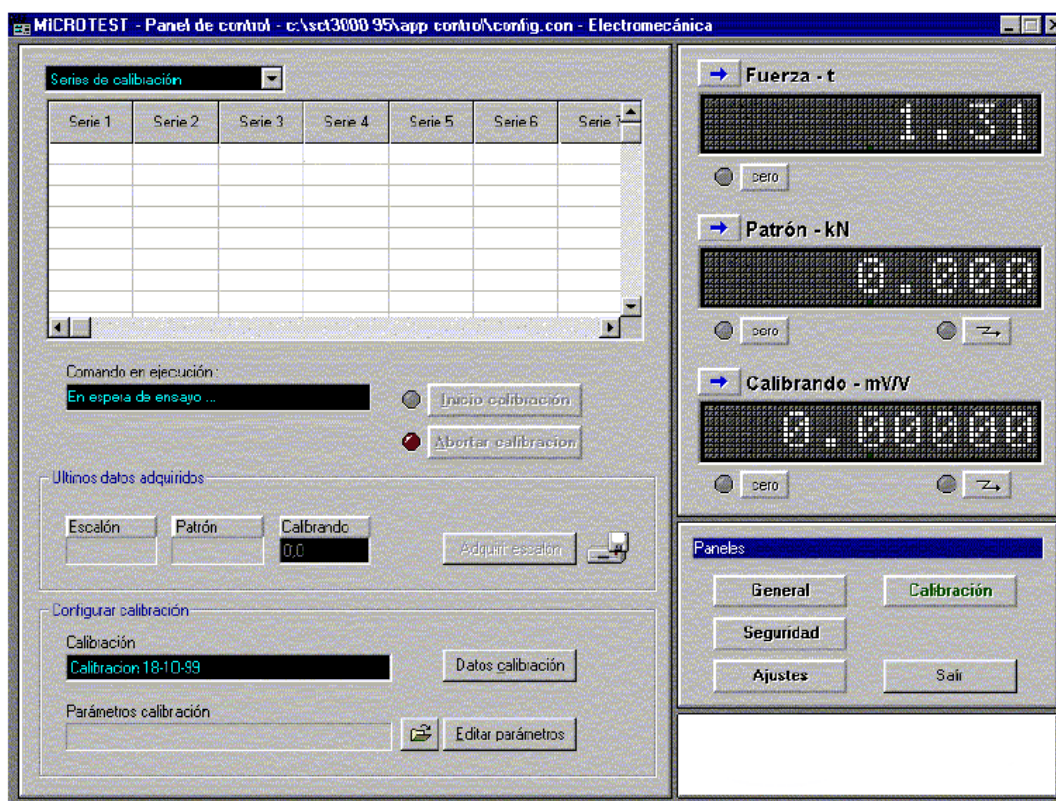


Figura 24: Aspecto del Panel de Control del Software de Gestión

- Editor de secuencias de ensayo:

El editor de secuencias de ensayo, permite al usuario crear secuencias de ordenes para componer ensayos completos. Estas secuencias de ensayo personalizadas pueden grabarse en el sistema de forma que puedan ser utilizadas con posterioridad, pues son ejecutadas de forma automática por el panel de control.

- Emisión de certificados de calibración:

El módulo de emisión de certificados de calibración, permite al operador recuperar datos de calibraciones previamente realizadas y generar los informes necesarios.

- Control de accesos:

El modulo de control de acceso permite al operador establecer distintas limitaciones de uso a diferentes usuarios. El administrador del sistema establece que usuarios tienen acceso a que partes del programa.

6.4.2.4.-Esquema de funcionamiento del Sistema de calibración de Fuerza.-

En definitiva, de cara a la gestión del laboratorio y la elaboración de procedimientos específicos de calibración en el área de fuerza, se define el SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA como el conjunto formado por:

- Juego de transductores de fuerza patrones (de referencia y de trabajo).
- Dispositivo amplificador de la señal.
- Máquina de Generación de Fuerza.

Dicho sistema corresponde, por tanto, a lo que en Capítulo 4 se definió como una clásica cadena de medida realimentada (figura 9) donde el dispositivo de accionamiento corresponde a la máquina de generación de fuerza y se dispone de una tarjeta de control para la realimentación del sistema, gobernada por un sistema informático que realiza entre otras las funciones, la de almacenamiento, análisis y representación de los datos. El Esquema de funcionamiento del Sistema de calibración de Fuerza sería por tanto, el siguiente:

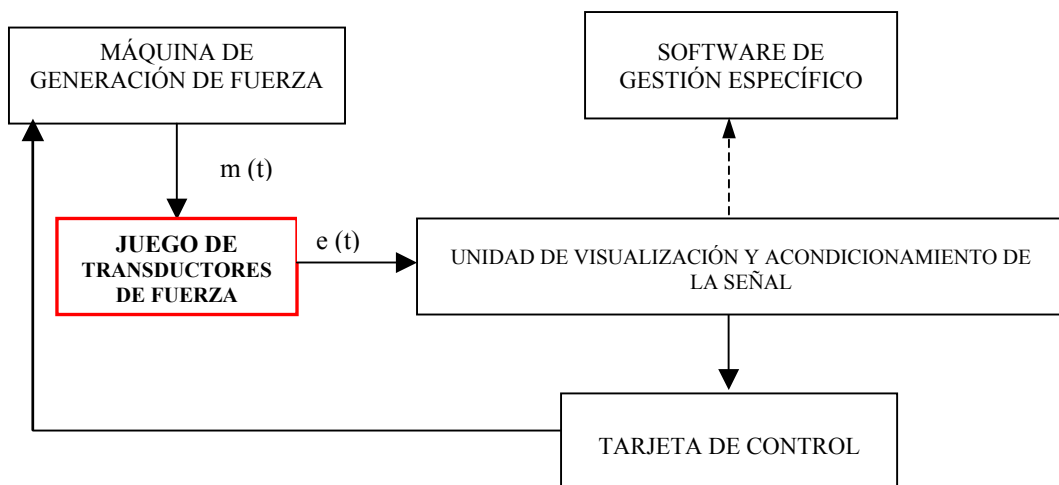


Figura 25 :Esquema del Sistema de Calibración de Fuerza

6.5.-CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA.

El objetivo de los anteriores apartados no ha sido el explicar con detalle el funcionamiento particular de cada uno de los elementos que componen el sistema de calibración de fuerza, ya sea del dispositivo de tratamiento de la señal o de cualquier otro, ni tampoco adentrarnos en el funcionamiento o las instrucciones de configuración y programación del software de control del sistema, aunque esta si haya sido una tarea

fundamental en el seno del trabajo de puesta en marcha del laboratorio realizada por el alumno.

Sin embargo, ha sido necesaria esta breve descripción, para remarcar, el hecho de que el sistema de calibración de fuerza debe ser considerado como un todo, debe ser por tanto calculada una incertidumbre global del sistema, ya que aunque se posea por separado la incertidumbre de cada uno de los transductores de fuerza de referencia (como decimos proveniente de una calibración en una máquina de referencia, Máquina de Pesos Muertos) que forman parte de él, o la incertidumbre del dispositivo amplificador / indicador, debe ser analizada la influencia en las señales de estos elementos, en una doble vertiente:

- Influencia provocada por las posibles interacciones mecánicas de la máquina de generación de fuerza (falta de alineación, estabilidad en la generación de las cargas, etc.).
- Influencia provocada por la configuración del sistema de control como dispositivo de accionamiento del sistema.

Tanto de cara a una posible acreditación ENAC por parte del laboratorio en el área de fuerza, como para la operación del mismo hasta dicho momento, se hacía necesaria una *caracterización* del que hemos denominado sistema de calibración de fuerza de cara a obtener una incertidumbre global del sistema, que deberá ser utilizada como incertidumbre patrón en todas aquellas calibraciones realizadas en dicho sistema, incertidumbre que, como dijimos en el Capítulo II del presente Proyecto, puede ser denominada como Capacidad Óptima de Medida.

Esta caracterización del sistema de calibración de fuerza, ha sido uno de los núcleos principales del trabajo realizado por el alumno en las prácticas de empresa realizadas y que ha generado un procedimiento específico que pasará a formar parte del sistema de gestión de la calidad del Laboratorio en cuestión, dicho procedimiento lleva por título: *PEAM XX: Caracterización del sistema de calibración de Fuerza*, y puede observarse, al igual que el resto de procedimientos en el documento correspondiente.

El objetivo de los próximos apartados no será, el reproducir el procedimiento específico, puesto este puede ser consultado en su integridad, sino destacar todos aquellos factores que, bien por no poder ser incluidos en un procedimiento específico debido al carácter que deben poseer este tipo de documentos, o bien por su singular

relevancia dentro de los mismos, son objeto de ser tratados a parte en la presente Memoria Descriptiva.

6.5.1.-Comentarios generales sobre la determinación de la Capacidad Óptima de Medida.-

La *capacidad óptima de medida* se define como la incertidumbre más pequeña que puede conseguir un laboratorio en su alcance de acreditación, cuando lleva a cabo “*calibraciones más o menos rutinarias*” de patrones de medida "casi ideales" establecidos para definir, realizar, conservar o reproducir una unidad de aquella magnitud, o bien uno o varios de sus valores, o cuando lleva a cabo calibraciones más o menos rutinarias de instrumentos de medida diseñados para la medida de aquella magnitud.

La fijación de la capacidad óptima de medida de los laboratorios de calibración acreditados, o que pretenden acreditarse como es el caso que nos ocupa, tiene que basarse en el método que a continuación se describe, pero debe estar soportada o confirmada además, por evidencias experimentales.

Las entidades que pretenden acreditarse, deben pues fijar su capacidad óptima de medida en cada uno de aquellas calibraciones para las que deseen estar acreditados, de forma que comenzaremos describiendo, a grandes rasgos, un método genérico para la estimación de dicha capacidad óptima, para analizar posteriormente el caso concreto de caracterización del sistema de calibración de fuerza que nos ocupa.

1. La *capacidad óptima de medida*, como hemos dicho, es uno de los parámetros que se utilizan para definir el alcance de un laboratorio de calibración acreditado, siendo los restantes, la magnitud física, el método de calibración o el tipo de instrumento a calibrar y el rango de medida. La capacidad óptima de medida viene normalmente consignada en el *programa de acreditación*, o bien en otra documentación que justifica la *decisión de concesión de la acreditación* o el *certificado de acreditación* que en muchos casos se emite como evidencia de acreditación. Es una de las partes esenciales de la información contenida en directorios de laboratorios acreditados que se emiten regularmente por las entidades de acreditación, y se utiliza por los clientes potenciales de los laboratorios acreditados para juzgar la idoneidad de un laboratorio para llevar a cabo calibraciones concretas, tanto en laboratorio como "in situ".

2. Para posibilitar la comparación de las capacidades óptimas de medida de varios laboratorios de calibración, en particular, laboratorios acreditados por entidades de acreditación distintas, se precisa la armonización del modo de expresar aquéllas. Para facilitar esto, se dan a continuación algunas explicaciones del término **capacidad óptima de medida**, basadas en su definición:

- Al hablar de "*calibraciones más o menos rutinarias*" se quiere poner de manifiesto que el laboratorio podrá alcanzar la capacidad óptima establecida en trabajos *normales* que realice conforme a su acreditación. Resulta obvio que hay casos en que el laboratorio sería capaz de "hacerlo mejor" como resultado de amplias investigaciones y precauciones adicionales, pero estos casos no están incluidos en la definición de capacidad óptima de medida, a menos que el laboratorio tenga una política clara de llevar a cabo tales investigaciones científicas (en cuyo caso, éstas se convierten en el tipo de calibraciones "más o menos rutinarias" del laboratorio).
- La inclusión en la definición del calificativo "*casi ideal*" significa que la capacidad óptima de medida no debe depender de las características del dispositivo a calibrar. El concepto de ser casi ideal lleva consigo, pues, que no debe haber una contribución significativa a la incertidumbre de medida atribuible a efectos físicos asociados a imperfecciones del dispositivo que vaya a calibrarse. Sin embargo, hay que dar por hecho que existe tal dispositivo. Si se constata que, en un caso particular, incluso el dispositivo más "ideal" disponible contribuye a la incertidumbre de medida, esta contribución deberá tenerse en cuenta para la determinación de la capacidad óptima de medida, y habrá que dejar sentado que la capacidad óptima de medida se refiere a la calibración de ese tipo de dispositivos.
- La definición de capacidad óptima de medida implica que, en el ámbito de su acreditación, un laboratorio no puede pretender utilizar una incertidumbre de medida más pequeña que la capacidad óptima de medida calculada. Esto significa que se pedirá al laboratorio que fije una incertidumbre mayor que la que corresponde a la capacidad óptima de

medida, siempre que se compruebe que el proceso real de calibración aumenta, significativamente, la incertidumbre de medida. Normalmente, el equipo a calibrar puede contribuir a dicho aumento de la incertidumbre. Es obvio que la incertidumbre real de medida nunca será más pequeña que la capacidad óptima de medida.

3. Debe señalarse que, de acuerdo con la definición, el concepto de *capacidad óptima de medida* sólo es aplicable a los resultados para los que el laboratorio posea la correspondiente acreditación. Entonces, este término, en sentido estricto, tiene un carácter administrativo y no tiene que reflejar, necesariamente, la capacidad técnica real del laboratorio. Existe la posibilidad de que un laboratorio aplique, en la acreditación, una incertidumbre de medida mayor que la que correspondería a su capacidad técnica, si tiene razones de orden interno para hacerlo así. Estas razones internas suelen darse cuando la capacidad real tiene que mantenerse confidencial para clientes externos, por ejemplo, cuando se hacen trabajos de investigación y desarrollo o cuando se proporciona servicio a clientes especiales. La política de la entidad de acreditación deberá ser garantizar la acreditación en cualquier nivel aplicable si el laboratorio es capaz de llevar a cabo calibraciones a ese nivel. (Todo esto se refiere no sólo a la capacidad óptima de medida sino también a todos los parámetros que definen el alcance de un laboratorio de calibración).
4. Corresponde a la entidad de acreditación fijar la capacidad óptima de medida. Para la estimación de la incertidumbre de medida que define la capacidad óptima de medida, debe seguirse el procedimiento que mencionamos en el presente apartado. La *capacidad óptima de medida* deberá fijarse al mismo nivel que el requerido para los certificados de calibración, es decir, como incertidumbre expandida y, normalmente, con un factor de cobertura $k=2$. (Sólo en aquellos casos excepcionales en que no pueda suponerse que la distribución es normal, o en que la valoración esté basada en pocos datos, la capacidad óptima de medida tiene que fijarse con una probabilidad del 95% aproximadamente. Véanse los apartados 3.4.5 y 3.4.6).
5. A la hora de evaluar la capacidad óptima de medida, se tendrán en cuenta todas las componentes que contribuyan a la incertidumbre de medida de forma

significativa. La evaluación de aquellas contribuciones que, se sabe, varían con el tiempo o con cualquier otra magnitud física, puede basarse en los límites de las variaciones posibles que se supone puedan tener lugar en condiciones de trabajo normales. Por ejemplo, si se sabe que el patrón de trabajo utilizado tiene una deriva, la contribución originada por ésta entre calibraciones sucesivas del patrón tendrán que tenerse en cuenta al estimar la contribución a la incertidumbre del patrón de trabajo.

6. En algunos campos, la incertidumbre de medida puede depender de ciertos parámetros adicionales, por ejemplo, en el caso del sistema de calibración de fuerza, esta incertidumbre dependerá, como se comentará posteriormente, de algunos parámetros de la configuración del mismo (como por ejemplo, el rango de aproximación elegido durante las calibraciones). Estos parámetros adicionales se fijarán junto con la magnitud física en cuestión, y se establecerá la capacidad óptima de medida para los parámetros adicionales. Esto suele hacerse dando la capacidad óptima de medida en función de estos parámetros.
7. Normalmente, la *capacidad óptima de medida* se establece de forma numérica. Cuando es de aplicación el punto anterior, es decir, cuando la *capacidad óptima de medida* es una función de la magnitud a la cual se refiere (o de cualquier otro parámetro), debe darse en forma analítica pero, en este caso, puede ser conveniente proporcionar también un diagrama. Asimismo tiene que quedar claro si la capacidad óptima de medida se da en términos absolutos o relativos. (Normalmente las unidades empleadas dan ya la explicación necesaria, pero si se trata de magnitudes adimensionales se precisa una explicación por separado).
8. En determinadas ocasiones, se suele exigir el requisito de que la *capacidad óptima de medida* calculada deba estar "apoyada o confirmada por evidencias experimentales". Ello significa que la entidad de acreditación no debe fiarse sólo de una evaluación de la incertidumbre de medida. Tienen que llevarse a cabo intercomparaciones bajo la supervisión de la entidad de acreditación, o de alguien designado por ella, para verificar la evaluación mencionada.
Es decir, se trataría de comparar los resultados obtenidos tras la calibración de un mismo equipo llevada a cabo en varios laboratorios, con el objetivo de analizar las desviaciones detectadas entre ambas calibraciones.

6.5.2.-Opciones para la calibración de un sistema de calibración de fuerza

Tras haber realizado una serie de consideraciones generales sobre el cálculo de la capacidad óptima de medida pasamos a describir de forma genérica, las tres opciones principales disponibles para calibrar un sistema de calibración de fuerza y establecer sus incertidumbres de medida:

a) Transductor/es de fuerza desprendibles:

Si el transductor o los transductores de fuerza que componen el sistema, se pueden desmontar de la instalación, tal y como es el caso que nos ocupa, además de su calibración inicial, estos transductores deben ser recalibrados periódicamente contra un patrón conveniente, de cara a asegurar la trazabilidad de las medidas efectuadas con el mismo y a analizar su estabilidad en el tiempo (deriva). Sin embargo, este método da una calibración exacta al transductor patrón, no considera las pérdidas en la instalación tal como fricción, falta de axialidad en el sistema, condiciones climáticas etc, etc. La instrumentación asociada se puede calibrar con el transductor o por separado contra otro patrón.

b) Transductor de fuerza patrón permanentemente instalado y calibrado mediante un patrón de transferencia:

Cuando la desinstalación del transductor no sea factible, se deberá dejar, por tanto el transductor de fuerza patrón en su posición, permanentemente instalado en la máquina y utilizar un patrón de transferencia para realizar las calibraciones del mismo.

Antes de la instalación el transductor permanente de fuerza se debe calibrar sobre su gama operacional completa, simulando en lo posible las condiciones operacionales anticipadas incluyendo la gama, la dirección, el índice del cambio, y la duración de la fuerza aplicada, así como temperatura y la simulación de un ciclo de funcionamiento típico. Esta calibración inicial se utiliza para determinar su error de retorno a cero, histéresis, linealidad y otros errores.

En estos casos, en los intervalos convenientes durante la vida del sistema, un *patrón de transferencia* se deberá por tanto instalar en el sistema, en serie con el dispositivo permanente y las salidas se compararán sobre una gama de fuerzas aplicadas. Estas calibraciones aseguran que el nivel de incertidumbre esté mantenido, y también servirán para identificar cualquier problema en la instalación o en el transductor.

c) Transductor permanentemente instalado de la fuerza sin la calibración periódica

Por último, esta opción debe ser considerada únicamente cuando el o los transductores de fuerza no puedan ser desinstalados y la calibración "in-situ" mediante un patrón de transferencia sea imposible, es decir, cuando no sean posibles las dos opciones anteriores. En estos casos, la calibración inicial debe establecer un nivel de incertidumbre en conformidad con los requisitos del sistema para acomodar la deriva y la deterioración en el transductor de fuerza durante su vida operacional. Una cierta confianza en la incertidumbre operacional en curso puede ser alcanzada periódicamente realizando una calibración de la desviación y comprobando unos o más puntos de funcionamiento bien definidos incluyendo la fuerza aplicada cero.

Aunque esta opción pueda ser una solución práctica y de hecho inevitable en algunas circunstancias, la trazabilidad de los resultados de medida de fuerzas obtenidas por estos sistemas es mala, incluso si la calibración inicial estaba efectuada en referencia a patrones de alta exactitud y a los que se posea trazabilidad conocida.

6.5.3.-Comentarios sobre la determinación de la Capacidad Óptima de Medida del sistema de calibración de Fuerza .-

Teniendo en cuenta:

- Las características del sistema de calibración de fuerza descritas en el apartado 6.3.2.
- Las consideraciones generales sobre el cálculo de la capacidad óptima de medida descritas en el apartado 6.4.1.
- Las opciones existentes para la Calibración de un Sistema de Calibración de Fuerza descritas en el apartado 6.4.2.

se pueden abordar algunas consideraciones relevantes acerca de la caracterización del sistema de calibración de Fuerza objeto de estudio. Teniendo en cuenta que para la evaluación de la capacidad óptima de medida del sistema de calibración de fuerza se hizo necesario:

- 1º. Una planificación de medidas para la determinación de la Capacidad óptima de medida de sistema de calibración de fuerza.-
- 2º. Un cálculo de dicha capacidad óptima de medida a raíz de los resultados de las pruebas efectuadas, así como de los datos procedentes de características

técnicas de los equipos, certificados de calibración y demás factores influyentes.

6.5.3.1.-Planificación de medidas para la caracterización de la máquina.-

En cuanto a la planificación que se siguió, podríamos decir que se dividió en 4 fases:

- 1°. Seleccionar varios transductores de fuerza patrones a modo de transductores de referencia, tal que entre todos cubriesen el rango completo de fuerzas hasta llegar al alcance máximo de la máquina en cuestión.
- 2°. Dichos transductores patrones de referencia deben estar calibrados en una máquina nacional de Fuerza de cara a determinar sus “*valores de referencia*”. Dichas calibraciones deberán ser actualizadas cada 24 meses con lo que el proceso de caracterización del Sistema se realizará cada vez que se actualicen dichas calibraciones.
- 3°. Será necesaria la realización de ensayos de “creep”, que tendrán como objetivo el cálculo de la incertidumbre (w_{creep} (%)) derivada de la variación de la señal de los transductores de fuerza patrones motivada por la fluctuación en la generación de la fuerza en la máquina. Esta incertidumbre pasará a formar parte de la capacidad óptima de medida objeto del presente procedimiento.
- 4°. Por último, se deberá abordar el análisis de los resultados obtenidos durante los ensayos correspondientes al punto 3, los resultados del certificado de calibración de los transductores patrones en un laboratorio de referencia, correspondientes al punto 2, así como de otros factores que no serán evaluados de forma empírica sino mediante valores obtenidos de:
 - Características de los equipos proporcionadas por los fabricantes.
 - Sucesivas calibraciones de los transductores de fuerza patrones en el laboratorio de referencia.
 - De la configuración del sistema de calibración de fuerza, en función del rango de aproximación y la unidad de trabajo, escogidos en función del nivel de exactitud deseado.

El esquema de cálculo que se deriva de la anterior planificación es el que mostramos en el siguiente gráfico:

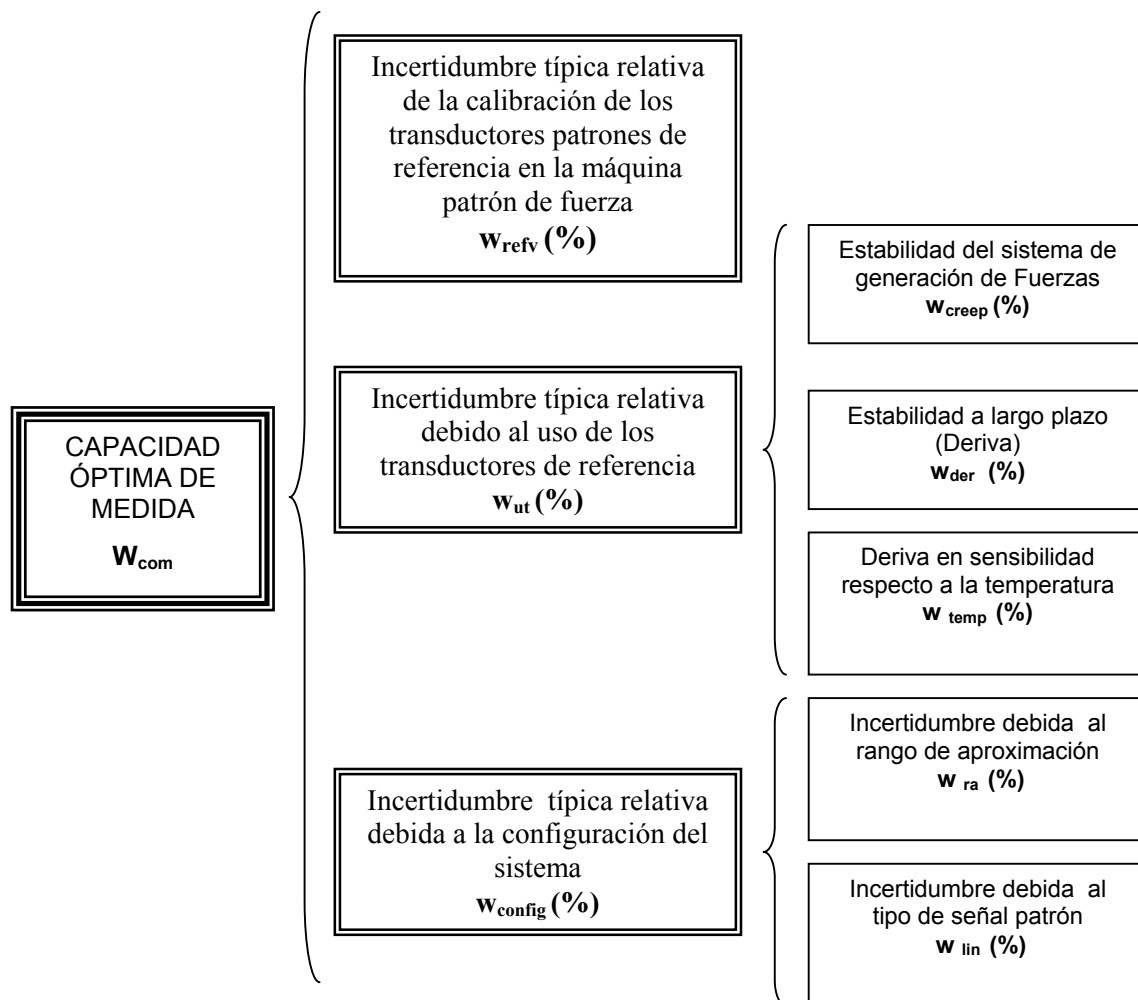


Figura 26:Esquema de cálculo de la capacidad óptima de medida

6.5.3.2.-Comentarios a cerca de la incertidumbre de los transductores patrones.-

Este es, obviamente el primero de los términos contribuyentes a la incertidumbre global del sistema, correspondiente al 2º punto de la planificación de medidas antes descrita. Se trata de la incertidumbre de los transductores de fuerza patrones que han debido ser calibrados en un laboratorio de referencia en un patrón primario de fuerza.

Para determinar la incertidumbre relativa expandida de los valores de referencia $w_{refv} (\%)$, se deben tener en cuenta las contribuciones de los transductores patrones de referencia, del indicador asociado y por último de la máquina patrón de fuerza (Patrón Primario: Máquina de Pesos Muertos). Todas estas contribuciones están contempladas en los certificados de calibración de los transductores de referencia, realizados en base a la Norma UNE 7-474-95 parte 3, que incluyen:

- *La incertidumbre relativa expandida de la máquina patrón de fuerza* (Máquina de pesos muertos) utilizada por el laboratorio de referencia (CEM). En nuestro caso, la incertidumbre relativa expandida con la que la máquina patrón de fuerza genera las fuerzas, expresada en tanto por ciento sobre el valor de la medida es de 0,002 % (k=2).
- *Valores de reproducibilidad con y sin rotación.* En los procedimientos de calibración de este tipo de instrumentos de medida de fuerza se realizan dos series de medidas con el transductor de fuerza sobre la misma posición, y dos más girando el instrumento, sobre posiciones uniformemente distribuidas sobre su eje, con lo que se pretende eliminar el efecto de las componentes no axiales de las fuerzas aplicadas debidas a posibles imperfecciones de alineamiento en el sistema de generación de fuerza, tomando, pues, como medida del instrumento, la indicación media de tres valores en diferentes posiciones rotacionales.
- *Error de interpolación,* pues los transductores de fuerza de referencia están calibrados para ser usados como equipo de patrón en las calibración de máquinas de ensayo de materiales uniaxiales.
- *Error de resolución,* del dispositivo indicador utilizado para la amplificación e indicación de la señal de los patrones.
- *Error de cero*
- *Error de Reversibilidad.*

Para el cálculo de las incertidumbres derivadas de los errores antes mencionados, proporcionadas en los certificados de calibración, se ha utilizado la evaluación de la incertidumbre “tipo B”, asignando a la incertidumbre asociada una distribución de probabilidad rectangular, triangular o arcosenoidal según el caso.

La incertidumbre relativa de la calibración de los transductores patrones de referencia en la máquina Nacional de fuerza (w_{refv} (%)) que formará parte de la incertidumbre correspondiente a la capacidad óptima de medida será la indicada en el certificado de calibración dividida por factor de cobertura correspondiente:

$$w_{\text{refv}} (\%) = \frac{W_{\text{cert}}}{K}$$

6.5.3.3.-Comentarios a cerca de la incertidumbre debida al uso del sistema.-

La incertidumbre relativa expandida debido al uso de los transductores de referencia (W_{ut} %) estará compuesta, tal y como se observa en el gráfico por los siguientes términos:

- *Justificación de la incertidumbre debida a la estabilidad del sistema de calibración de Fuerzas (w_{creep} (%)).-*

La justificación de estos ensayos, se basa en que durante las calibraciones que se realicen en el sistema de calibración de fuerza, los transductores de fuerza patrones estarán expuestos a cargas en ensayos de larga duración donde es necesario mantener la carga o la posición durante mucho tiempo en un nivel determinado con alta estabilidad.

Es por esto por lo que es importante analizar la **estabilidad o fluencia** de las medidas de los transductores de fuerza, cuando estos se ven sometidos a estos plazos tan prolongados de exposición a carga.

Como dijimos en el apartado correspondiente a las características de este tipo de máquinas de generación de fuerza, el mantenimiento de un escalón de carga dado con alta estabilidad en el tiempo se consigue con mayor facilidad y precisión que en los sistemas hidráulicos.

Esta incertidumbre se determinará en base a los resultados obtenidos en los ensayos de creep descritos en el apartado 3.3.3.1 del procedimiento específico no entrando en más detalle al respecto.

- *Justificación de la incertidumbre debida a la estabilidad a largo plazo, deriva, de los transductores de fuerza patrones (w_{der} (%)).*

Otra, componente de la que hemos denominado incertidumbre de uso del sistema es la deriva de los transductores de fuerza de referencia.

Como dijimos en el apartado 2.5 se entiende por estabilidad la capacidad del transductor para mantener constante su curva de calibración con el paso del tiempo (meses), la deriva por tanto, es la cuantificación de la variación de dicha curva de calibración con el paso del tiempo

La incertidumbre debida a la deriva entre calibraciones debe calcularse, en condiciones normales, a partir del historial de calibraciones de cada transductor de fuerza patrón utilizado en las calibraciones, es decir el cálculo es fruto del apartado 2 de la planificación de medidas expuesta anteriormente.

▪ *Justificación de la incertidumbre debida al efecto de la temperatura ($w_{temp}(\%)$)*

Como dijimos en el apartado 4.5.4.1, los transductores de fuerza extensiométricos, experimentan una variación en la señal de salida bajo la influencia del cambio de temperatura. Una variación de temperatura tiene un efecto sobre el balance de cero del puente de Wheatstone formada por las galgas y también sobre el módulo de elasticidad “ E ” del cuerpo elástico del transductor, afectando a la sensibilidad del mismo.

Sin embargo, a pesar de que los transductores de fuerza patrones están compensados para disminuir el efecto de la temperatura en la señal de salida de los mismos, siempre queda un efecto remanente. Destacar que, normalmente, el efecto de la temperatura sobre el valor del cero es mayor que el efecto sobre el valor de carga nominal (sensibilidad), tal y como se observa en la siguiente gráfica:

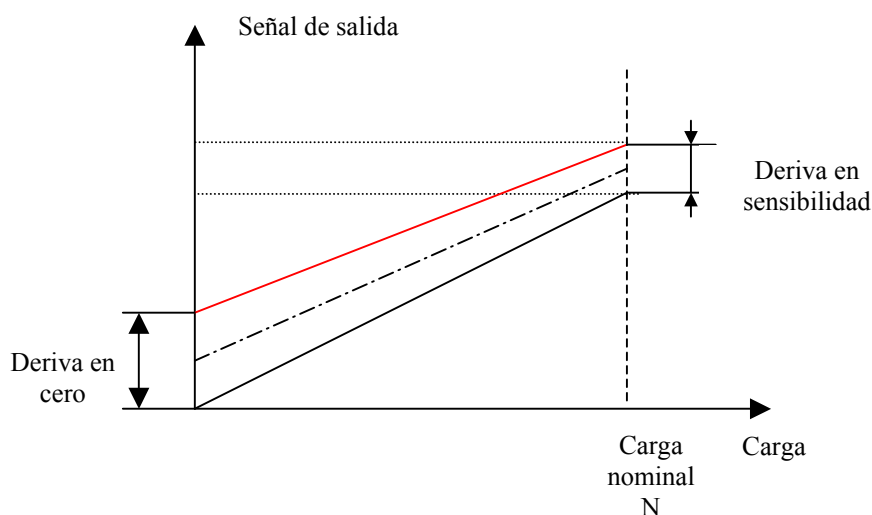


Figura 27 : Gráfica representativa del efecto de la temperatura

La cuantificación de este efecto se realizará en base a las especificaciones proporcionadas por el fabricante (Evaluación tipo B de la incertidumbre típica, véase apartado 3.4.2.2), puesto que el efecto de la temperatura sobre la señal de los transductores es lo suficientemente pequeño para que no pueda ser detectado o evaluado de forma empírica, mediante ensayos.

Concretamente, el fabricante de los transductores de fuerza propiedad del laboratorio, cuantifica la variación de la señal con respecto a la temperatura mediante un

coeficiente “TK” expresado en “% / 10 ° C”, es decir este coeficiente represente la variación en tanto por ciento (referido a la carga nominal) de la señal del transductor patrón por cada 10 ° C de variación de temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la señal de los transductores patrones se produce a lo largo de todo el rango de trabajo del transductor, de forma que se poseen los valores del coeficiente TK para carga nula y carga nominal de cada transductor, los valores respectivos son:

$$TK_C (\%/10^\circ \text{C}) = 0,01 \% = 0,001 (\% / 1^\circ \text{C})$$

$$TK_0 (\%/10^\circ \text{C}) = 0,015 \% = 0,0015 (\% / 1^\circ \text{C})$$

A modo de ejemplo, decir que si se efectúan mediciones por ejemplo a una temperatura de 12° C, cuando la temperatura de referencia¹² es de 22 ° C ($\Delta T = 10 \text{ K}$) los coeficientes tendrán un valor de:

$$TK_C (\%) = 0,01 \%$$

$$TK_0 (\%) = 0,015 \%$$

Considerando la sensibilidad nominal (C_{nom}) de los transductores, que es de 2 mV/V, y estando los coeficientes de variación térmica expresados en tanto por ciento sobre el valor de la sensibilidad nominal podemos tener, en el caso extremo una deriva de cero de $\pm 0,0003 \text{ mV/V}$ y una variación de la sensibilidad de $\pm 0,0002 \text{ mV/V}$, para cualquier medida entre cero y el rango nominal.

Se tienen, con estos valores proporcionados por el fabricante, unos intervalos de variación tanto de la sensibilidad del transductor, como de la señal de cero de los mismos, por lo que no se podrán realizar correcciones de la señal de salida por efectos de la temperatura, puesto que lo que se conoce es un intervalo de variación entre cuyos límites varían los valores de sensibilidad y de cero del transductor, el hecho de que el valor de sensibilidad varíe en sentido positivo o negativo y la magnitud de dicha variación, depende de multitud de variables intrínsecas al propio transductor, incluso transductores del mismo modelo y alcance nominal presentan una respuesta distinta ante cambios de temperatura, lo que si se asegura es que dichas variaciones estarán comprendidas entre los valores especificados por dicho semiintervalo.

¹² Como temperatura de referencia debemos considerar la temperatura a la que se ha realizado la calibración de los transductores de fuerza en el laboratorio de referencia y que consta en su certificado de calibración.-

Sin embargo el conocimiento de dicho intervalo nos permitirá asignar a la incertidumbre global de las medidas realizadas con los transductores, una componente debida a las variaciones de temperatura.

Para poder realizar correcciones en la señal de salida hubiese sido necesario, que las calibraciones de los mismos en el laboratorio de referencia, hubiesen sido realizadas a varias temperaturas, obteniendo así curvas de calibración a distintas temperaturas, por ejemplo a 10, 20 y 30° C respectivamente, lo que nos permitiría realizar las correcciones pertinentes teniendo en cuenta la variación de la señal de salida para cada transductor pues, como hemos dicho, en esa variación influyen muchos factores inherentes a la construcción del transductor en sí mismo, que tan sólo pueden ser evaluados de una forma empírica.

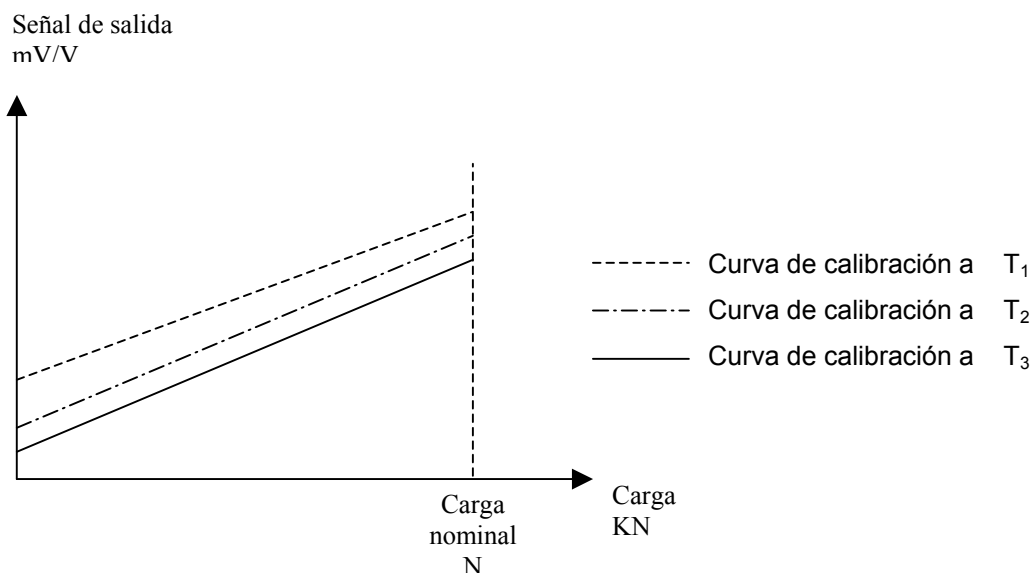


Figura 28 :Gráfica de las diferentes curvas de calibración a distintas temperaturas

Sin embargo, puesto que se trata de una influencia pequeña y para evitar la calibración del mismo transductor en varias temperaturas, lo cual encarecería notablemente el coste de la misma, a la incertidumbre global, como hemos dicho, la afectaremos por una incertidumbre debida a la deriva en sensibilidad por efecto de la temperatura, a la que denominaremos $w_{\text{der-temp}} (\%)$.

La deriva en cero por efecto de la temperatura, a pesar de tener un valor mayor que sobre la sensibilidad, puede corregirse con el ajuste a cero (tara) con la cadena de medida expuesta durante algún tiempo a la temperatura de trabajo y sin carga, se trata

pues de atemperar los equipos de calibración el tiempo suficiente, teniendo la precaución de que no existan focos puntuales de calor sobre el equipo de medida y que no exista un gradiente térmico superior a 5 ° C por hora. Es por esto por lo que en los procedimientos específicos de calibración siempre se hace constar, en el apartado correspondiente a las *Operaciones Previas*, la necesidad de ubicar los instrumentos de medida de fuerza objeto de la calibración, en la sala de calibración junto con los transductores de fuerza patrones durante un periodo de tiempo suficiente para estabilizar su temperatura a la de la sala. Esta situación descrita es extrapolable a la generalidad de los instrumentos, especialmente a los equipos eléctricos, que son especialmente sensibles a los cambios de temperatura.

Por tanto, esta misma situación se presenta, aunque en menor medida, en el dispositivo amplificador indicador digital utilizado para la captación de la señal de los transductores de fuerza patrón, los coeficientes térmicos TK_A para un cambio de 10 K en la temperatura con respecto a la de referencia (referidos al valor de la sensibilidad nominal) en este caso tiene un valor de:

$$TK_{Ac} < 0,002 \%$$

$$TK_{A0} < 0,001 \%$$

Al igual que antes, la deriva en cero por efecto de la temperatura, puede ser corregida, con el ajuste a cero tras el atemperamiento adecuado del equipo a la temperatura de trabajo.

Por ello, de cara al cálculo de la incertidumbre global del Sistema de Calibración de Fuerza, se agregarán ambos efectos (el del transductor y el del dispositivo indicador), de forma que el coeficiente de variación de la sensibilidad para un cambio de temperatura de un grado centígrado respecto a la de referencia será de:

$$TK_c (1^\circ C) = TK_{Ac} + TK_{Bc} = 0,001\% + 0,0002 \% = 0,0012 \%/ 1 K$$

Las condiciones ambientales en el laboratorio donde se realizarán las “calibraciones rutinarias” están controladas y permanecen estables durante el tiempo de ejecución de los ensayos, por lo que se ha fijado un intervalo de variación de admisible durante las mismas de $\pm 1^\circ C$ (ver procedimientos específicos dedicados a la calibración de instrumentos de medida de fuerza). Por lo que para obtener el valor de variación relativa de la señal de salida con respecto a la sensibilidad nominal (TK) para una temperatura distinta de un grado centígrado ($\Delta T \neq 1^\circ C$) simplemente habrá que

multiplicar el valor de TK correspondiente para una variación de 1° C, por el incremento de temperatura permitido, en nuestro caso:

$$TK (\Delta T \neq 1^\circ C) = TK (1^\circ C) * \Delta T$$

$$TK (2^\circ C) = TK (1^\circ C) * 2 = 0,0012\% * 2 = 0,0024 \%$$

Una vez calculada la variación relativa de la salida del transductor se podrá calcular la incertidumbre asociada sin más que considerar una distribución de probabilidad arcosenoidal, :

$$W_{\text{der-temp}} (\%) = \frac{TK\%}{\sqrt{2}} = 0,00169 \%$$

En resumen, la interpretación de esta incertidumbre es la siguiente:

Supongamos que el resultado de la medida (valor de deformación media con rotación) de un transductor de 500 KN de alcance para su carga máxima, extraída de su certificado de calibración, es de 1,999910 mV/V, de forma que durante las calibraciones rutinarias se permitirá una variación total de temperatura de 2° C. El coeficiente térmico (incluyendo la influencia del transductor de fuerza y del módulo indicador es de 0,0024%, entendiéndolo como tal el semiintervalo de variación expresado en tanto por ciento sobre el valor de la sensibilidad nominal, de ahí que la incertidumbre asociada al valor de la medida correspondiente a ese valor de carga deba verse afectada por una incertidumbre asociada a la variación de la sensibilidad del transductor por efecto de la temperatura.

Para calibraciones realizadas “in situ” (como la calibración de máquinas de ensayo de materiales) en las que las instalaciones donde se realizan las mediciones normalmente carecen de sistemas de acondicionamiento climático, las temperaturas durante la calibración pueden diferir en más de 2 grados respecto a la temperatura de referencia, en ese caso se deberá proceder de la misma forma, agregando a la incertidumbre el efecto de la variación de la sensibilidad, sin más que considerar el nuevo valor de ΔT .

6.5.3.4.-Comentarios a cerca de la incertidumbre debida a la configuración del sistema.-

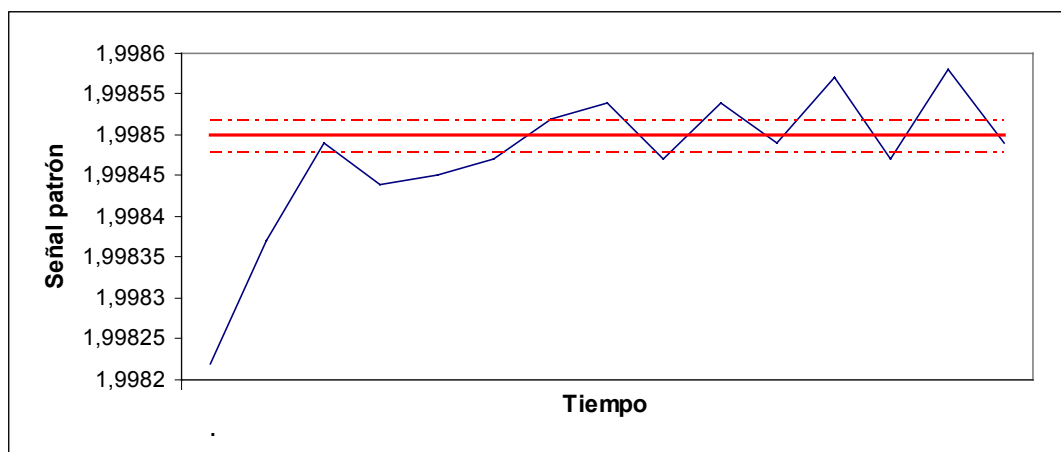
Por último, existen dos parámetros en la configuración del modo de trabajo del sistema, que definirán la incertidumbre total de sistema de calibración de fuerzas y que deberán ser escogidos en función del “*nivel de exactitud*” que se desee alcanzar durante las mismas:

- *Justificación de la incertidumbre debida al rango de aproximación w_{ra} (%)*

Uno de ellos es el “*rango de aproximación al escalón*”. Este es un parámetro asociado al control del sistema, concretamente la selección del mismo se realiza en el módulo de “*Parámetros de control*” del panel de control del software de calibración automática, que especifica la precisión con la que se desea que el sistema se aproxime a cada uno de los escalones de carga en los que se va a realizar la calibración

Puesto que, como sabemos, la máquina ajusta la señal patrón hasta conseguir un determinado valor, se ha de decidir entre que valores de la señal patrón será válido tomar medidas en el equipo a calibrar. A tal efecto, en los parámetros de la calibración se deberá especificar la magnitud de ese valor del rango de aproximación que constituirá el semiintervalo de variación entre los cuales el sistema dará validez a la señal patrón permitiendo así la toma de la señal del mensurando.

A modo de ejemplo decir: *que si deseamos registrar la lectura del equipo a calibrar en un escalón de una serie de calibración correspondiente a 0,80000 mV/V y se ha especificado un rango de aproximación de 0,00001 mV/V la lectura del indicador patrón será válida cuando esté entre los valores 0,80001 y 0,79999 mV/V, intervalo dentro del cual se podrá tomar la lectura del indicador del equipo a calibrar.*



Señal del transductor: —————

Límites del intervalo definido por el r.a: - - - - -

Figura 29 :Gráfica de las diferentes curvas de calibración a distintas temperaturas

El rango de aproximación al escalón delimitará, por tanto, el intervalo de valores del transductor de fuerza patrón entre los que se tomará la señal del equipo a calibrar.

Esto ocasionará un error, pues la señal patrón no tendrá un valor exacto y único en todas las series dentro de una calibración sino que se moverá dentro de un intervalo de valores delimitados por el rango de aproximación usado, es decir:

$$\text{Señal patrón} \in [\text{escalón deseado} \pm \text{rango de aproximación}]$$

Por lo tanto el rango de aproximación constituye el semiintervalo de variación de la señal patrón. Se puede definir por tanto un “*error de aproximación*” y derivado de este una incertidumbre asociada w_{ra} (%) que pasará a formar parte de la incertidumbre global del Sistema de Calibración de Fuerza.-

- *Justificación de la incertidumbre debida al error de linealidad* w_{lin} (%)

Por otro lado es importante decidir si el puente de medida (sistema de amplificación / indicación de la señal) estará configurado en modo analógico o no.

Si durante la calibración se desea trabajar en unidades de Fuerza (KN) se deberá configurar el módulo de tratamiento y amplificación de la señal introduciendo los valores de deformación en mV/V correspondientes al valor de cero y carga nominal del transductor de fuerza patrón correspondiente (consultando para ello el certificado de calibración). En dicho caso la señal de que proporcionará el módulo de amplificación corresponderá a una salida analógica, convirtiendo la deformación del transductor (en unidades de mV/V), a unidades de fuerza (KN) en base a la recta teórica entre ambos puntos.

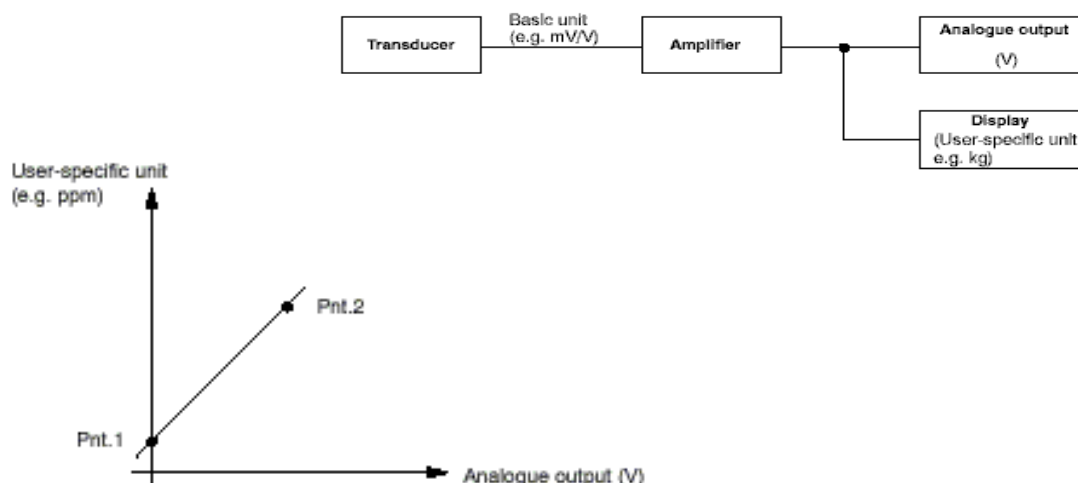


Figura 30: Conversión de la señal en el amplificador

Sin embargo, si durante la calibración se desea trabajar en unidades de mV/V , se utilizará la salida digital del amplificador, no siendo necesaria en dicho caso, la operación de configuración anteriormente descrita sobre dicho dispositivo, con lo que el sistema trabajará directamente con una unidad básica como la señal de deformación del transductor de fuerza patrón, en unidades de tensión mV/V.

La elección de uno u otro sistema provocará o no la existencia de un error de linealidad. En efecto:

Si se trabaja en modo analógico la indicación del dispositivo amplificador estará proporcionada en unidades de fuerza (KN), indicación proveniente de la conversión de la señal patrón real en mV/V en base a una recta que pasa por los puntos:

$$(0,0) , (F_N, \bar{X}_{r,N})$$

donde:

- F_N : es la capacidad Nominal del transductor de fuerza en unidades de fuerza (KN).
- $\bar{X}_{r,N}$: es la deformación media con rotación (mV/V) a carga nominal especificada en el certificado de calibración correspondiente.

Los valores de deformación proporcionados por dicha recta la recta responderán a la siguiente ecuación:

$$\bar{X}_{recta,i} = \frac{\bar{X}_{r,N}}{F_N} * F_i$$

donde:

- F_i : corresponde a cada uno de los puntos de calibración expresados en KN.
- $\bar{X}_{recta,i}$: corresponde al valor de deformación en mV/V proporcionado por la recta en cada uno de los puntos de calibración.

Por tanto, cuando se opere con unidades de fuerza (KN) estaremos asumiendo un error de linealidad, que se calculará en base a la siguiente expresión:

$$e_{lin}(\%) = \frac{\bar{X}_{recta,i} - \bar{X}_{r,i}}{\bar{X}_{r,i}} * 100$$

donde:

- $e_{lin}(\%)$: error de linealidad en tanto por ciento sobre el valor de la deformación en cada punto de calibración “i”.

- $\bar{X}_{r,i}$: es la señal de referencia del transductor patrón en cada uno de los puntos de calibración (deformación media con rotación) indicada en el certificado de calibración correspondiente.
- $\bar{X}_{r,recta}$: valores de deformación del transductor patrón proporcionados por la recta.

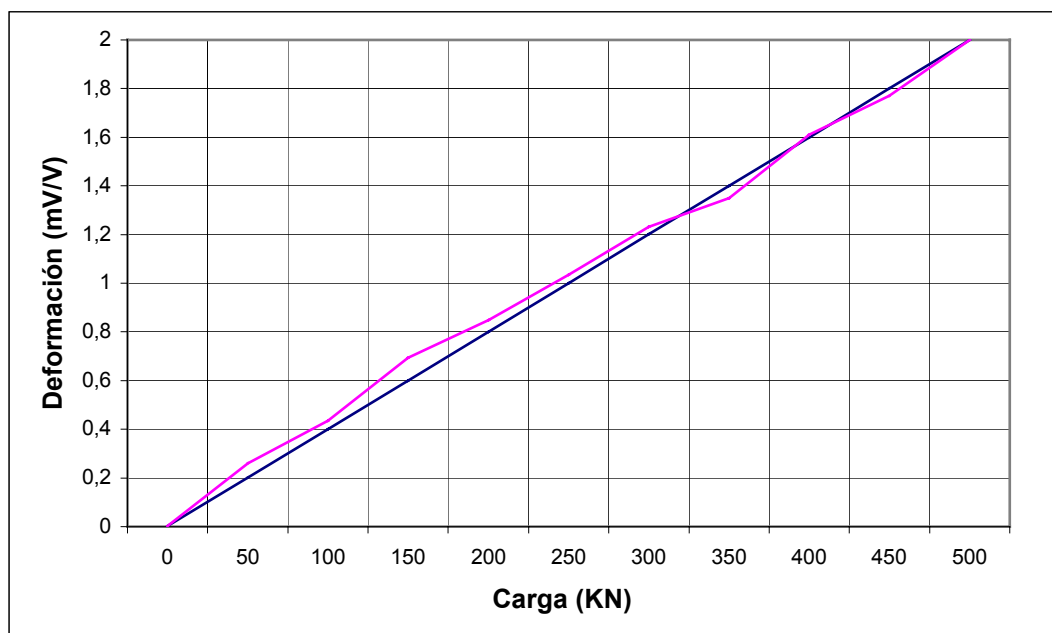


Figura 31: Gráfica error de linealidad

Se contemplará una contribución a la incertidumbre total del sistema de calibración de fuerza en base a este error de linealidad, considerando que se comporta en base a una distribución de probabilidad rectangular, donde $e_{lin}(\%)$ es el semiintervalo de variación:

$$w_{lin} (\%) = \frac{e_{lin}(\%)}{\sqrt{3}}$$

A modo de ejemplo proporcionamos los valores del error de linealidad y la incertidumbre asociada al mismo en cada uno de los puntos de referencia, para el caso del transductor patrón de 100 KN, cuando la calibración se realice con sentido de cargas a compresión. Estos valores se obtienen sin más que seleccionar la unidad de trabajo (KN o mV/V) en la hoja de cálculo correspondiente a la capacidad óptima de medida del sistema cuando se trabaja con dicho transductor patrón y en ese sentido de cargas (Hoja de Cálculo: COM 100KN C).

Fuerza en KN	$\bar{X}_{r,i}$	$\bar{X}_{recta,i}$	e_{lin}	$e_{lin}(\%)$	$w_{lin}(\%)$
10	0,20013	0,20017	0,00004	0,01949	0,01125
20	0,40026	0,40033	0,00007	0,01699	0,00981
30	0,60041	0,60050	0,00009	0,01505	0,00869
40	0,80055	0,80066	0,00011	0,01366	0,00788
50	1,00071	1,00083	0,00012	0,01149	0,00663
60	1,20089	1,20099	0,00011	0,00894	0,00516
70	1,40107	1,40116	0,00009	0,00664	0,00383
80	1,60126	1,60133	0,00006	0,00387	0,00224
90	1,80146	1,80149	0,00003	0,00172	0,00099
100	2,00166	2,00166	0,00000	0,00000	0,00000

En definitiva, en función del nivel de exactitud que se desee durante las calibraciones, se fijará el valor de dicho rango de aproximación y se decidirá con que unidad de la señal patrón se desea trabajar. Esta configuración dará como consecuencia un determinado valor de la incertidumbre típica relativa debida a la configuración del sistema (w_{config}), que será la combinación de ambas incertidumbres descritas :

$$w_{config}(\%) = \sqrt{w_{ra}^2 + w_{lin}^2}$$

Para analizar la influencia de esta incertidumbre observemos para ello las dos siguientes tablas:

En la primera de ellas se da el valor de la incertidumbre correspondiente a la capacidad óptima de medida cuando se trabaja en mV/V y con el menor rango de aproximación permitido por el sistema, 0,00001 mV/V:

F(KN)	$w_{lin}(\%)$	$w_{ra}(\%)$	$w_{config}(\%)$	$w_{com}(\%)$	$w_{com}(k=2)\%$
10	0,00000	0,002885	0,002885	0,01739	0,03478
20	0,00000	0,001442	0,001442	0,01069	0,02137
30	0,00000	0,000962	0,000962	0,00822	0,01645
40	0,00000	0,000721	0,000721	0,00678	0,01356
50	0,00000	0,000577	0,000577	0,00570	0,01140
60	0,00000	0,000481	0,000481	0,00471	0,00943
70	0,00000	0,000412	0,000412	0,00404	0,00808
80	0,00000	0,000361	0,000361	0,00345	0,00690
90	0,00000	0,000320	0,000320	0,00326	0,00652
100	0,00000	0,000288	0,000288	0,00311	0,00622

y en la segunda cuando se trabaja en unidades de fuerza (KN) con el menor rango de aproximación permitido en ese caso, 0,001 KN:

F(KN)	w _{lin} (%)	w _{ra} (%)	w _{config} (%)	w _{com} (%)	u _{com} (KN)	W _{com} (k=2)%
10	0,01125	0,005775	0,012647	0,02131	0,00213	0,04262
20	0,00981	0,002887	0,010225	0,01472	0,00294	0,02944
30	0,00869	0,001925	0,008897	0,01208	0,00362	0,02416
40	0,00788	0,001444	0,008016	0,01047	0,00419	0,02095
50	0,00663	0,001155	0,006735	0,00880	0,00440	0,01761
60	0,00516	0,000962	0,005249	0,00704	0,00422	0,01408
70	0,00383	0,000825	0,003920	0,00561	0,00393	0,01123
80	0,00224	0,000722	0,002349	0,00416	0,00333	0,00831
90	0,00099	0,000642	0,001183	0,00345	0,00311	0,00690
100	0,00000	0,000577	0,000577	0,00315	0,00315	0,00630

Observemos como dicha capacidad óptima de medida aumenta considerablemente. Si lo que pretendemos es clasificar un instrumento de medida de fuerzas en base a la norma Norma UNE 7-474-95/3 o calibrar un instrumento de medida de fuerza electrónico de elevadas prestaciones, evidentemente nos interesará que nuestra incertidumbre sea la que se proporciona en la primera de las tablas.

Sin embargo, si lo que se va a calibrar es un dinamómetro mecánico con comparador de reloj con una resolución de, por ejemplo, 100 N, ese incremento en la incertidumbre que produce el cambio en la configuración del sistema nos resultará indiferente, pues la incertidumbre debida a la resolución del propio instrumento:

$$w_{res}(\%) = \frac{r}{\sqrt{12}} = 0,0288 \text{ KN}$$

es como mínimo 10 veces mayor que la incertidumbre típica u_{com} (KN) que es la que se utiliza para el cálculo como incertidumbre patrón. Por tanto, en este último caso, podría interesar trabajar en unidades de KN, con la comodidad que ello representa, puesto que el aumento en la incertidumbre no resulta trascendente.

6.6.-CALIBRACIÓN DE LA CARGA EN MÁQUINAS DE ENSAYO DE MATERIALES UNIAXIALES.-

La importancia que tiene la magnitud Fuerza resulta evidente cuando se tiene en cuenta que ésta magnitud está directamente relacionada con los ensayos de materiales encaminados a evaluar la calidad de productos en sectores como el siderúrgico, cementos y hormigones, plásticos y textiles, transporte y contenedores de gas, industria automotriz, etc.

Existe por tanto, una gran cantidad de empresas que realizan ensayos de materiales, normalmente ensayos destructivos, sobre piezas extraídas por muestreo de su producción. En la experiencia adquirida por el alumno durante su periodo de prácticas de empresa, 2 son los ensayos más demandados, en función del sector en el que se desarrollan:

- En el sector de la producción de prefabricados de Hormigón: Ensayos sobre probetas o piezas prefabricadas de Hormigón endurecido (Ensayos de compresión).
- En el sector siderúrgico y en general empresas con alta presencia de mecanizados, como puede ser el Sector Aeronáutico: Ensayos Sobre piezas metálicas (Ensayos de tracción / compresión).

Existen otros sectores, como por ejemplo, el sector de los plásticos (fabricación de piezas en PVC) en el que la realización de ensayos de tracción sobre probetas normalizadas es también práctica habitual.

En todos estos casos, estos ensayos se realizan en las llamadas máquinas de ensayos de materiales uniaxiales, que las empresas se ven “obligadas” por sus sistemas de gestión de la calidad a calibrar como equipos de medición y ensayo que se tratan; nos movemos por tanto en el ámbito de la “*metrología voluntaria*” de la que se habló en el apartado 2.6.

6.6.1.- Máquinas de ensayo. Características.-

Se entiende por *máquina de ensayo* aquella máquina, cualquiera que sea su sistema de aplicación de la carga (hidráulico, electromecánico...), cuya finalidad sea la de realizar ensayos (normalmente ensayos destructivos) sobre cualquier tipo de pieza, tanto respecto al material: piezas de hormigón endurecido, piezas metálicas o plásticas entre otros, como respecto a su morfología. Incluyendo ambos sentidos de aplicación de fuerza (fuerzas a tracción y/o compresión).

Los sistemas de medida de la carga de las máquinas de ensayos de materiales suelen estar basados fundamentalmente en alguno de estos dos sistemas:

- Sistemas electrónicos: basados en un transductor de fuerza /célula de carga con un dispositivo indicador asociado. Este tipo de sistema de medida de fuerzas está ligado fundamentalmente a aquellas máquinas con sistema electromecánico de generación de fuerzas.

- Sistemas de medida de la carga por presión hidráulica: basados en la medida mediante manómetros de la presión generada en el pistón o pistones de accionamiento. Obviamente este tipo de sistemas de medida de cargas están asociados a máquinas con sistema hidráulico de generación de fuerzas, sistemas que como sabemos presentan inconvenientes frente a los de tipo electrónico.

En cualquiera de los casos, la máquina deberá estar provista de:

- Al menos una escala analógica o display digital que permita la lectura de la carga con la exactitud requerida.
- Un sistema de lectura que pueda ser leído desde la posición de trabajo.
- En determinadas ocasiones, un sistema que permita mantener la carga máxima alcanzada para ser leída después de terminado el ensayo, antes de que se ponga a cero

Asimismo, la máquina de ensayos dispondrá de un sistema de control, que permitirá que la máquina pueda verificarse, capaz de aplicar la fuerza de modo uniforme y sin fluctuaciones. También permitirá la aplicación de las cargas a las velocidades constantes prescritas. Este sistema de control podrá gobernarse bien de forma manual o de forma automática.

6.6.2.-Comentarios sobre el procedimiento de calibración de máquinas de ensayo.-

Como dijimos anteriormente eran dos los ensayos más frecuentes, los ensayos a compresión sobre piezas de hormigón endurecido y por otro lado los ensayos a compresión / tracción sobre piezas metálicas, para ambos existen normas UNE referentes a la calibración y verificación de las máquinas de ensayo que los realizan, a saber:

- UNE-EN 12390-4: Ensayos de Hormigón endurecido. Parte 4: resistencia a compresión. *Características de las máquinas de ensayo.*
- UNE-EN ISO 7500-1:2000 Materiales metálicos. *Verificación de máquinas para ensayos uniaxiales estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo tracción/compresión. Verificación y calibración del sistema de medida de fuerza (ISO 7500-1:1999).*

En este tipo de normas se especifica que son varias las características a evaluar para un examen del correcto funcionamiento de una máquina de ensayos, concretamente habrá que evaluar o calibrar:

- La transmisión de la carga (estabilidad).

- Planeidad de los platos, entendiéndose como tales los platos con asiento a rótula centrados ambos en el eje vertical central de la máquina.
- Control de la velocidad de aplicación de la carga.
- La exactitud de la *indicación de carga*.

Será este último de los ensayos, el que se prestará por parte del Laboratorio donde se realizan estas prácticas empresariales, ensayo que consistirá fundamentalmente en la comparación de dicha indicación de carga proporcionada por la máquina a calibrar, con la indicación de un equipo de calibración¹³ formado por:

- Un transductor de fuerza patrón, montado en la máquina, mediante el uso de los accesorios adecuados que permitan una aplicación de carga lineal y sin excentricidades.
- Su dispositivo de visualización asociado.

En ambas normas UNE mencionadas, se definen las condiciones y la forma de ejecución de los ensayos, consistentes básicamente en la realización de un mínimo de tres series de ciclos de carga y/o descarga (en función del tipo de máquina que se trate), de forma que los resultados de las medidas efectuadas permitan clasificar cada uno de los sistemas de medida de fuerza de la máquina, en base a una serie de errores detectados durante la calibración.

A continuación, mostramos las tablas en base a las cuales se realiza la clasificación del sistema de medida de la máquina de ensayos en cuestión:

TABLA DE ERRORES MÁXIMOS PERMITIDOS, SEGÚN UNE EN-12390-4 PARA MÁQUINAS DE ENSAYO DE HORMIGÓN ENDURECIDO A COMPRESIÓN:

Clase de Máquina	Error relativo de exactitud % ²⁾	Error relativo de repetibilidad % ²⁾	Error relativo de cero % ²⁾	Resolución de la máquina % ²⁾
1	±1,0	1,0	±0,2	0,5
2	±2,0	2,0	±0,4	1,0
3	±3,0	3,0	±0,6	1,5

2) Los porcentajes tabulados son los valores máximos permitidos para las clases de máquinas relacionadas

¹³ Los dos elementos que los constituyen forman parte del sistema de calibración de fuerza descrito en el apartado 6.3.2.2 del presente Proyecto

TABLA DE ERRORES MÁXIMOS PERMITIDOS, SEGÚN ISO 7500-1 PARA MÁQUINAS DE ENSAYO UNIAXIALES DE TRACCIÓN / COMPRESIÓN:

Clase de Máquina	Error relativo de exactitud q % ²⁾	Error relativo de repetibilidad b % ²⁾	Error relativo de reversibilidad v % ²⁾	Error relativo de cero f ₀ % ²⁾	Resolución de la máquina % ²⁾
0,5	±0,5	0,5	±0,75	±0,05	0,25
1	±1,0	1,0	±1,5	±0,1	0,5
2	±2,0	2,0	±3	±0,2	1,0
3	±3,0	3,0	±4,5	±0,3	1,5
2) Los porcentajes tabulados son los valores máximos permitidos para las clases de máquinas relacionadas.					

Resaltar que en ambas normas, se especifica que el equipo de calibración debe cumplir con los requisitos recogidos en la Norma *UNE 7-474-95 parte 3*, que como se dijo en el apartado 6.3.1 define la *Calibración de los instrumentos de medida de fuerza (carga)* para la calibración de la indicación de la carga de las *máquinas de ensayo uniaxiales*, y que este debe poseer una clase metrológica igual o mejor que la clase para la cual se va a calibrar la máquina de ensayos en cuestión. En el caso que nos ocupa, como sabemos, los transductores de fuerza patrones están clasificados como clase 00 lo que posibilita la calibración de cualquier máquina de ensayos y con lo que se asegura una cadena de *trazabilidad* que traslada las medidas efectuadas sobre la máquina de ensayos calibrada, hasta el patrón primario, con el que han sido calibrados los transductores de fuerza patrones.

Como se puede apreciar de la simple observación de las tablas anteriores, la norma ISO 7500-1 es más genérica permitiendo la calibración en sentido de aplicación de cargas tanto a compresión como a tracción incluyendo el análisis del error de reversibilidad en aquellas calibraciones realizadas en tracción, circunstancia que no contempla la norma UNE EN-12390-4 que se refiere tan sólo a calibraciones en sentido de cargas a compresión, como es lógico por tratarse de máquinas de ensayo de probetas de hormigón endurecido.

Existen más diferencias entre ambas normas, que pueden observarse en el procedimiento específico elaborado por el alumno *PEAM XX: Calibración de la carga en*

máquinas de ensayo uniaxiales, pero fundamentalmente estas diferencias son palpables especialmente, en:

- La selección de los escalones de carga.
- Aplicación de las cargas.
- Las diferentes formas de evaluar la influencia de los accesorios mecánicos, contemplando o no, según el caso, la existencia de una cuarta serie de calibración para ello.
- La forma de evaluar la influencia del pistón en aquellas máquinas con un sistema de medida de carga derivado de la presión hidráulica.
- Por último, aunque la clasificación de la máquina se realiza en base a los mismos criterios, existen algunas consideraciones particulares que difieren de una norma a otra.

Por tanto, la elaboración de un procedimiento específico de calibración que intentase englobar la totalidad de casos que se pueden presentar, se convirtió en una tarea especialmente delicada, exigiendo una constante actualización, renovando y alterando sus contenidos a medida que se iba ganando experiencia en la calibración de este tipo de máquinas de ensayo.

La variabilidad de las opciones existentes radica no sólo en la calibración en base a una u otra norma, o a la existencia de una gran variedad de sistemas de aplicación y de medición de cargas existentes en las máquinas de ensayo y que deben estar contempladas en el procedimiento, sino que además este, debe contemplar todas las instrucciones y cálculos referentes a unas calibraciones que se han denominado como *calibraciones genéricas*, es decir, calibraciones que no han sido efectuadas en base a alguna de las normas antes mencionadas.

Al contemplar este tipo de calibraciones genéricas estamos abarcando también la gran variedad en cuanto a las necesidades de los clientes, que exigían distintos tipos de calibraciones.

En este sentido existen determinado tipo de clientes que sencillamente desconocen las normas UNE que regulan la calibración de sus máquinas de ensayo, o que a pesar de tener conocimiento de las mismas, solicitan calibraciones con unas connotaciones muy concretas que no están contempladas en ninguna de las normas UNE

mencionadas, todo ello amparados por el contenido del apartado correspondiente a la *calibración de equipos de medición de ensayo* de su sistema de *gestión de la calidad*.

Ocurre en este sentido algo parecido a lo mencionado en el apartado 6.3.1. referente a la calibración de instrumentos de medida de fuerza, en el que se decidió elaborar dos procedimientos, uno de ellos, realizado teniendo en cuenta todas las prescripciones contempladas en la norma UNE 7-474-95/3 y que permitía la clasificación del instrumento de medida de fuerza en base a la misma, y otro realizado en base a criterios metroológicos generales, definiendo unas condiciones menos exigentes.

Sin embargo, en este caso, ambas opciones se incluyen en el mismo procedimiento, es decir, el procedimiento *PEAM XX: Calibración de la indicación de carga en máquinas de ensayo uniaxiales*, incluye todas las instrucciones necesarias para la calibración de la indicación de la carga en base a:

- La norma UNE-EN 12390-4.
- La norma UNE-EN ISO 7500-1:2000
- Criterios metroológicos generales, calibraciones definidas en el procedimiento como Calibraciones Genéricas.