

# EXPOSICION DOCENTE DE LOS CONCEPTOS DE CALIBRACIÓN, TRAZABILIDAD METROLÓGICA E INTERCOMPARACIÓN.

**M. Samplón, J.S. Artal**

Departamento Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería Técnica Industrial.  
Universidad de Zaragoza.

María de Luna nº3. Edificio C, Torres Quevedo. 50018. Zaragoza.  
Tlfn.:976 762152. Fax.: 976 762226.

[msamplon@posta.unizar.es](mailto:msamplon@posta.unizar.es), [jsartal@posta.unizar.es](mailto:jsartal@posta.unizar.es)

## **Resumen.**

Una de las lagunas formativas más habituales en los planes de estudio de las carreras técnicas suele ser la descripción de la metodología de medidas e incertidumbres asociadas a la misma. Este tipo de contenidos se suelen introducir, aunque muy por encima, en la asignatura de Física de primer curso de carrera centrándose otras asignaturas más específicas de metrología en aspectos como sensores, descripción de los equipos de instrumentación, instrumentación automatizada e inteligente, e instrumentos virtuales. Como resultado de ello la percepción del alumno pasa a ser que su instrumento de medida es bueno y fiable en la mayor parte de las ocasiones que lo utiliza; mide correctamente y su precisión se extiende hasta el número de cifras que presenta su visualizador.

En el presente documento se ha pretendido construir una ejemplificación sencilla y práctica de los mecanismos de calibración inherentes a su equipo de medida y que lo enlazan con los patrones primarios universales (recreación material de una magnitud física concreta, p.e. voltio u ohmio), y la influencia que tiene dicha cadena de calibración en el empeoramiento de la incertidumbre de medida asociada a dicho instrumento.

**Palabras clave:** Calibración, trazabilidad metrológica, intercomparación.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

Históricamente una de las áreas más descuidadas en los planes de estudio de las diferentes ingenierías y licenciaturas técnicas ha sido la correspondiente a la metrología y en particular al análisis de las fuentes de incertidumbre en todo proceso metrológico. Esto, unido a la profusión de las exposiciones teóricas en la pizarra sin la adecuada contrastación con la realidad a través de un programa de prácticas, que generalmente ha adolecido de escaso y no adecuadamente distribuido en el tiempo, ha llevado al estudiante medio a minusvalorar la importancia y dificultad que pueden tener los distintos procesos de medida.

En las últimas revisiones de planes de estudio se ha tratado de paliar esta carencia a través de asignaturas específicas de metrología pero que en general han hecho más hincapié en la presentación sistemática de los diferentes sensores existentes para las magnitudes físicas más relevantes, [1] en el análisis estructural de los artefactos de medida [2] y, como *state of the art*, en la instrumentación inteligente, buses de

instrumentación, instrumentación virtual [3] e instrumentación a través de internet [4], [5]. Sin embargo se ha seguido prestando poca atención a las bases teóricas de la metrología lo que se ha evidenciado por la poca atención que ha suscitado en el ámbito docente el renombrado GUM 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' emitido por el BIPM, (International Bureau of Weights and Measures) con toda la importancia que arrastra [6], [7], [8].

Si bien en los nuevos planes de estudio que van introduciéndose en las diferentes universidades, este tema está más cuidado, sigue percibiéndose una falta de sensibilización del estudiante medio hacia la calidad de una medida. La realidad constatable es que en la mayoría de los casos el estudiante tiene una fe de bases difusas, inconscientes, pero fe ciega al fin y al cabo, en los instrumentos de medida que se le ofrecen, especialmente si son comerciales, poseen un aspecto llamativo y el logotipo de alguna compañía de instrumentación conocida, presentan una amplia y compleja botonera y ofrecen en su visualizador muchos dígitos de resolución, tanto si tienen sentido como si no. De hecho la tendencia en general es a considerar todas las cifras visualizadas como relevantes.

A fin de paliar los problemas anteriormente expuestos, el presente trabajo propone una práctica de laboratorio que pretende recrear el proceso de calibración de un instrumento de medida. Esta práctica se desarrollará a lo largo de una o, más probablemente dada su amplitud, varias sesiones y ha sido diseñada bajo los siguientes condicionantes:

**A) Definir y emplear una unidad nueva de medida sobre una magnitud física perfectamente conocida por el estudiante.**

De esta forma, el estudiante es capaz de entender los mecanismos físicos envueltos en la calibración, dado que las leyes físicas asociadas a la unidad le resultan conocidas. Sin embargo, la imposibilidad de emplear las unidades del sistema internacional [9], [10] a la hora de realizar los cálculos y presentar los resultados van a llevarlo a un estado de inseguridad positiva que le harán recelar de un modo continuo de los resultados obtenidos, forzándolo activa y dinámicamente a revisar de forma continua todo el proceso que le está llevando a un resultado concreto.

**B) No hacer uso de instrumentos de medida comerciales sino entregarle al estudiante un instrumento sensible a la magnitud de nuestra unidad de medida desarrollado *ad-hoc* para la práctica y que presente controles intuitivos que faciliten su calibración de una forma clara y sencilla.**

Con esto se pretende conseguir que el estudiante cuestione la confianza que, como ya se ha apuntado, da de facto a todos los instrumentos comerciales. A lo largo de la práctica, y a través de un proceso de calibración, el estudiante investigará la buena o mala calidad metrológica de su instrumento de medida. Colateralmente, el desarrollo de instrumentación propia permite hacer uso de dispositivos de uso común en cualquier laboratorio docente de electricidad como son las fuentes de alimentación de tensión DC.

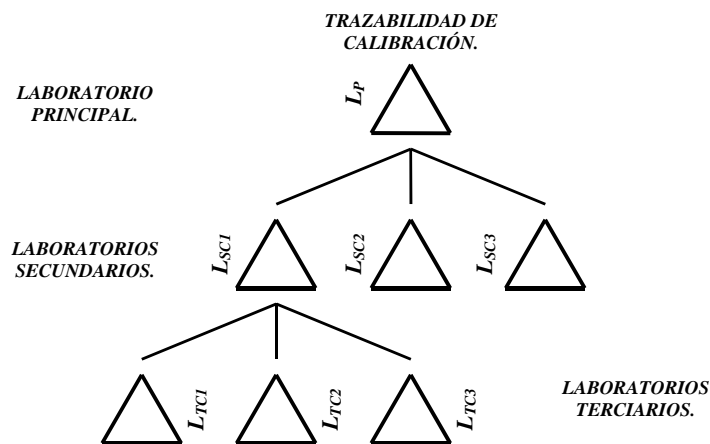
**C) Hacer mayor hincapié en los aspectos metrológicos que en los electrónicos.**

Dado que la magnitud que se va a manejar va a ser eléctrica, los instrumentos aludidos en el apartado B van a estar basados en circuitería electrónica que debe resultar conocida por el estudiante en el momento de afrontar la práctica. Esto resulta de interés, aunque secundario, para que se comprenda qué es lo que está haciendo realmente el instrumento.

Sin embargo resulta importante no caer en la tentación de convertir las sesiones en un ejercicio práctico de la asignatura de electrónica. De hecho, y desde el punto de vista metrológico, lo más relevante que van a tener los instrumentos va a ser un par de controles (potenciómetros) para el ajuste de fondo de escala y de cero.

**D) Recrear en el laboratorio una cadena de calibración desde el patrón primario universal hasta un instrumento de medida.**

De esta forma se pretende dejar patente que la única manera de confiar en los resultados de calibración de un instrumento de medida sea bajo la seguridad de que se pueden rastrear la cadena de patrones de forma ascendente hasta el patrón primario universal (*trazabilidad*), ver figura 1.



**Figura 1.** Cadena de distribución de la incertidumbre entre los distintos niveles de laboratorios de calibración.

**E) Propiciar una reflexión y posterior cuantificación de las fuentes de incertidumbre asociadas al procedimiento de medida.**

Se pretende diseñar una práctica en la que las fuentes de incertidumbre que se van a considerar sean experimentalmente lo suficientemente amplias como para que el estudiante tome una conciencia clara de su significado y relevancia.

En definitiva, la idea básica que agrupa a estos condicionantes es la creación de un entorno metrológico nuevo que aleje al estudiante de su contexto habitual de medida y que por tanto le obligue a cuestionar, y por ende a analizar la fiabilidad de su instrumento de medida calibrado, así como la metodología a emplear.

**2. OBJETIVOS.**

Desde el punto de vista docente, los objetivos formativos que se persiguen son, en orden de importancia, los siguientes:

- A) Que el estudiante adquiera conciencia de que la fiabilidad metrológica de su instrumento de medida depende de la información de calibración que posea del mismo antes que de su aspecto externo o complejidad estructural.

B) Que el estudiante deje de considerar los patrones universales como objetos de museo o rarezas de laboratorio, sino como instrumentos de definición y referencia de una unidad concreta.

C) Que el estudiante comprenda la necesidad de propagar la cadena de calibraciones desde un patrón primario universal hasta su instrumento estableciendo una conexión metrológica entre ambos.

D) Que el alumno experimente mediante una recreación práctica simplificada en el laboratorio, un posible proceso a seguir para la calibración de distintos equipos de medida.

E) Que el estudiante asuma la responsabilidad de la calibración que ha realizado sobre su instrumento de medida a través de una intercomparación con otros instrumentos calibrados.

### 3. ENTORNO DE MEDICIÓN.

Antes de pasar a indicar el desarrollo de la práctica se va a realizar una breve descripción de los instrumentos que se van a emplear en ella.

Como nota aclaratoria, en lo que sigue consideraremos genéricamente como “patrón” a cualquier instrumento que haya sido caracterizado metrológicamente, esto es, que haya sido calibrado<sup>1</sup>. Los patrones a su vez los clasificaremos como “referencias”, siendo éstas aquellos dispositivos que presentan una realización de una magnitud. Por otra parte entenderemos como “instrumentos de medida” aquellos capaces de medir una referencia, figura 2. Una referencia viene caracterizada metrológicamente por su valor ( $X$ ) e incertidumbre ( $U_X$ ), mientras que un instrumento de medida lo caracterizaremos por la desviación ( $D$ ) que presenta en la medida de una referencia, así como la incertidumbre de la desviación ( $U_D$ ). La desviación se obtiene por calibración y corresponde a la cantidad con la que hay que corregir el resultado dado por el instrumento de medida. Se define como:

$$D = X_{\text{REFERENCIA\_PATRON}} - X_{\text{INSTRUMENTO\_DE\_MEDIDA}}$$

Por otra parte, y salvo que se indique lo contrario, cuando se hable de incertidumbre siempre nos referiremos a incertidumbre expandida con un factor de cobertura  $k = 2$ .

La práctica se desarrollará en torno a la recreación de dos tipos de laboratorios de calibración: uno primario y varios secundarios.

El laboratorio principal o primario estará dotado de los siguientes dispositivos:

- Un patrón primario (referencia).
- Un dispositivo de atenuación calibrado (referencia).
- Un patrón secundario (instrumento de medida).
- Una referencia variable estable y no calibrada.

---

<sup>1</sup> El patrón primario universal resulta una excepción a lo anterior. Es un instrumento caracterizado metrológicamente dado que se conoce su valor, lógicamente la unidad y su incertidumbre, aunque no ha sido calibrado en el sentido habitual del término.

El equipamiento de los laboratorios secundarios va a ser el siguiente:

- Un patrón terciario global que será a su vez el patrón primario del laboratorio secundario (instrumento de medida).
- Una referencia variable estable y no calibrada.

A continuación se va a describir cada uno de ellos.

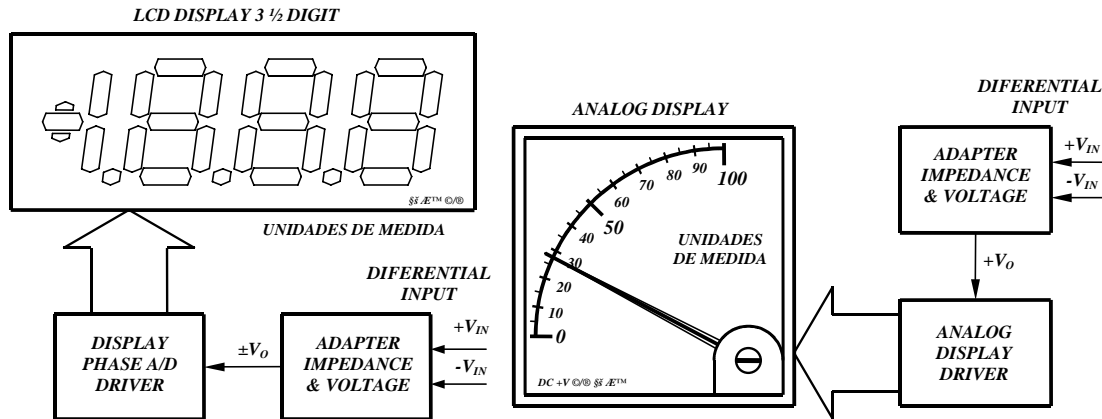


Figura 2. Indicador Digital y Analógico del número de unidades de medida.

### 3.1. Patrón primario (P).

Por comodidad en el tratamiento electrónico de las mediciones así como la comprensión intuitiva de los procedimientos de calibración, la magnitud que se ha elegido para implementar la unidad fundamental es la diferencia de potencial eléctrica en corriente continua. El dispositivo que implementa nuestra unidad es, esencialmente, una referencia de tensión, figura 3. El valor de salida se ha elegido de unas pocas decenas de mV a fin de dificultar su medición con precisión. Nótese que, contrariamente a lo que resulta habitual, en este caso buscamos activamente que aparezcan razonablemente grandes contribuciones a la incertidumbre de medida.

Si bien en un caso real la acotación de la incertidumbre del patrón primario pasaría entre otros por el análisis teórico de la física envuelta en su definición, así como en la medida/acotación de magnitudes de influencia, en nuestro caso esto se realizará simplemente mediante un voltímetro de suficiente precisión. En cualquier caso, esta caracterización se hará de forma previa al desarrollo de la práctica y simplemente se les comunicará el resultado a los estudiantes.

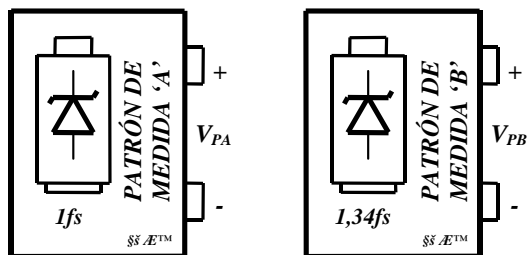
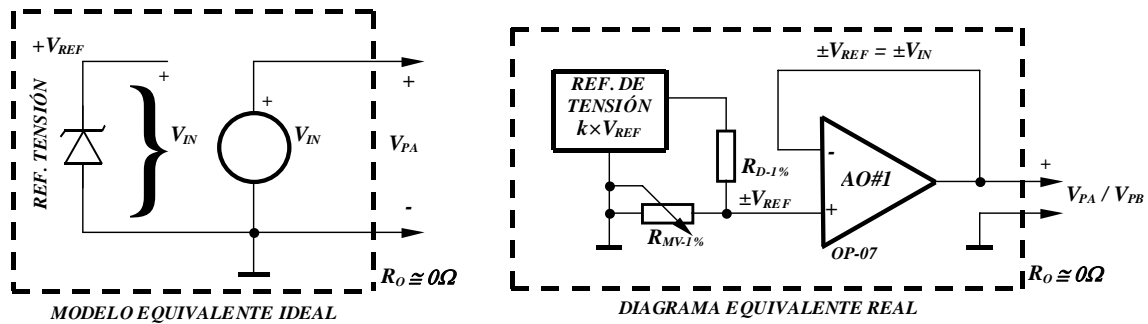


Figura 3.- Ejemplos de Bloques patrón primarios y valor unitario de las nuevas unidades de medida.

Estructuralmente nuestras unidades de medida se construirán a partir de un circuito integrado que sea una referencia de tensión, junto con un atenuador resistivo y un amplificador operacional que asegure una impedancia de salida muy baja, [11] figura 4.

A fin de referirnos en adelante a la nueva unidad, se ha optado por darle el nombre de *fascalio*, que se abreviará como “fs”. Así, nuestro patrón primario, referencia universal de diferencia de potencial en nuestro propio sistema de unidades tiene un valor de,

$$P \Rightarrow 1 \pm U_P \text{ (fs)}$$



**Figura 4.** Modelos equivalentes ideal y real de las referencias usadas como magnitud unitaria.

Si bien el estudiante ha de ser consciente de que estamos trabajando con tensiones eléctricas y por tanto de que existe un coeficiente de conversión entre el fascalio y la unidad correspondiente al sistema internacional, el voltio, resulta de importancia crítica *no revelarle en ningún momento* dicho coeficiente, dado que lo que buscamos es alejarlo de un entorno de medida que le resulte cómodo.

### 3.2. Dispositivos de atenuación ( $\eta_k$ ).

Para poder extender las escalas en que vamos a calibrar los sucesivos patrones secundarios a partir de nuestra definición/implementación del fascalio, necesitamos de un dispositivo capaz de establecer fracciones conocidas de una cierta diferencia de potencial. La implementación natural y sencilla de esto se hace a través de divisores resistivos. Si bien la caracterización natural de estos divisores resistivos debería realizarse a partir del análisis de las características geométricas y constitutivas de los mismos, así como del proceso tecnológico de construcción, para nuestros propósitos la caracterización de los atenuadores se realizará a través de un multímetro de suficiente precisión.  $\eta_t$  representa cociente de resistencias ( $t = 1, \dots, n$ ) para los diferentes juegos y es por tanto un parámetro adimensional.

Se dispondrá como mínimo de dos atenuadores construidos mediante dos y tres resistencias, respectivamente, del mismo valor nominal y conectadas en serie.

El primero de estos atenuadores vendrá caracterizado por el factor de atenuación ( $\eta_1$ ) entre la tensión de un extremo y el punto intermedio y la tensión entre los extremos de la cadena:

$$\eta_1 \Rightarrow \eta_1 \pm U_{\eta_1} \text{ (fs/fs)}$$

Donde  $\eta_1$  valdrá aproximadamente 0,5 fs/fs.

El segundo vendrá caracterizado por el factor de amplificación  $\eta_2$  entre la tensión entre un extremo y la primera resistencia y la tensión entre los extremos de la cadena:

$$\eta_2 \Rightarrow \eta_2 \pm U\eta_2 \text{ (fs/fs)}$$

Donde  $\eta_2$  valdrá aproximadamente 3,0 fs/fs.

Esta caracterización también se realizará de forma previa al desarrollo de la práctica y simplemente se comunicará el resultado a los estudiantes.

### 3.3. Patrón secundario (S).

El patrón secundario será un instrumento de medida con fondo de escala de unos tres o cuatro fascalios. Dado que es un patrón secundario del laboratorio principal y que va a constituir el patrón de transferencia para la calibración de los patrones que manejarán los estudiantes, será de cierta precisión. Preferentemente dispondrá de visualización digital y, como todos los instrumentos de medida que se están empleando, de un control de ajuste de cero y otro de ajuste de fondo de escala. Estará caracterizado por su desviación  $D_S$ :

$$D_S \Rightarrow D_S \pm U_{D_S} \text{ (fs)}$$

### 3.4. Referencia no calibrada.

La calibración del patrón secundario a partir del patrón primario se realizará a través del dispositivo de atenuación (divisor resistivo) con la ayuda de un dispositivo que actúe como referencia, del que se exige que sea estable, aunque no es necesario que esté calibrado. Desde un punto de vista constructivo, esta referencia no es sino un generador de tensión continua de salida regulable.

Los instrumentos en posesión de los laboratorios secundarios (representados por los diferentes grupos de prácticas) serán los siguientes equipos:

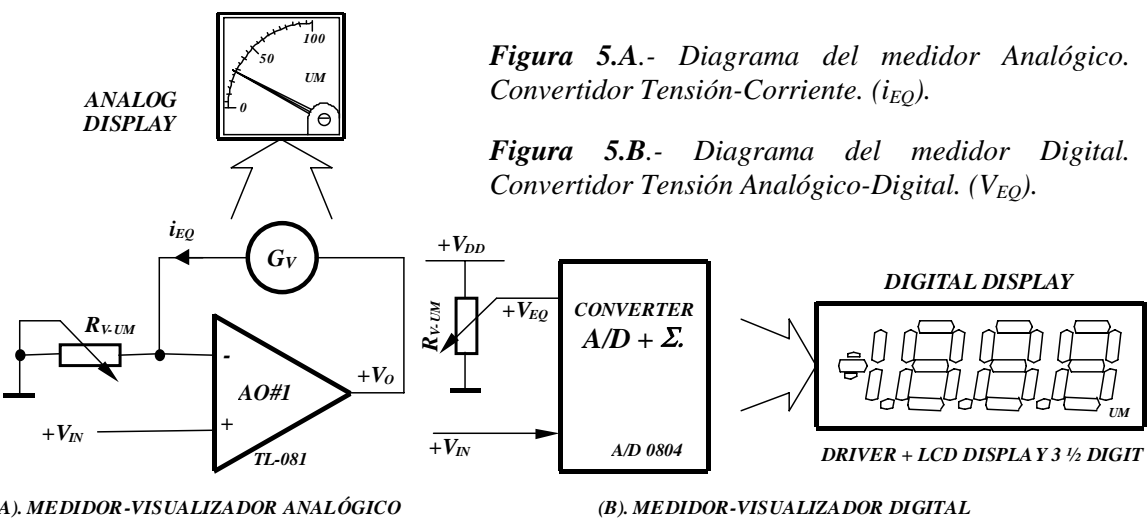


Figura 5.A.- Diagrama del medidor Analógico. Convertidor Tensión-Corriente. ( $i_{EQ}$ ).

Figura 5.B.- Diagrama del medidor Digital. Convertidor Tensión Analógico-Digital. ( $V_{EQ}$ ).

### 3.5. Patrón terciario (T).

El patrón terciario será un instrumento de medida, de menor precisión que el secundario, de visualización analógica o digital según los grupos y que dispondrá de controles de puesta a cero (para los fascalímetros analógicos éste será simplemente el tornillo del cero mecánico del visualizador) y de ajuste de fondo de escala. Análogamente vendrá caracterizado por su desviación  $D_T$ :

$$D_T \Rightarrow D_T \pm U_{DT} \text{ (fs)}$$

Los patrones terciarios con visualización analógica serán entregados, además, con un fondo en blanco solicitando a los estudiantes que dibujen la correspondiente escala graduada del instrumento a partir del ajuste de cero y de fondo de escala.

### 3.6. Referencia no calibrada.

La calibración del patrón terciario a partir del patrón secundario se realizará por comparación directa por lo que será necesario un dispositivo que actúe como referencia, del que se exige que sea estable, aunque no es necesario que esté calibrado (no es un patrón). Estructuralmente será similar a la homónima del laboratorio principal.

## 4. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA.

La idea básica de la práctica consiste en recrear un laboratorio primario, que posee un patrón universal con el que calibra un patrón secundario que actuará como patrón de transferencia para la calibración de patrones terciarios en posesión de los diferentes laboratorios de calibración. El laboratorio primario estará representado por el profesor-tutor de la práctica y su mesa de trabajo. Los laboratorios secundarios serán representados por los diferentes grupos de alumnos que asistan a la práctica. Si bien esta cadena metrológica se limita a estos dos niveles, es interesante observar que el proceso puede seguir enlazándose mediante el empleo de los patrones terciarios para la calibración de patrones cuaternarios que estarían en posesión de los grupos de estudiantes que asistiesen de forma posterior a la práctica. Dentro de esta estructura reducida de la cadena de calibraciones que estamos exponiendo, estos patrones cuaternarios podrían representar los instrumentos de planta de una empresa.

La práctica se iniciará con la presentación a los estudiantes del patrón primario que será el que definirá la unidad básica de medida *fascalia*. Con este patrón primario, el profesor-tutor calibrará un patrón secundario que estará a disposición de los diferentes grupos para la calibración de sus patrones terciarios. La práctica concluirá con una comprobación final de resultados mediante una intercomparación: se hará circular por los diferentes grupos un dispositivo que presente un determinado valor de la magnitud para que sea medido de forma reservada por todos ellos. Con los valores obtenidos por todos los grupos se construirá una gráfica que permita contrastar los resultados de la intercomparación y extraer consecuencias en una reunión final.



De manera esquematizada:

- Introducción y descripción teórica.
- Calibración del patrón secundario.
  - Ajuste de escala.
  - Calibración a una unidad.
  - Calibración del resto de la escala.
- Calibración de los patrones terciarios.
  - Ajuste de escala.
  - Calibración del resto de la escala.
- Intercomparación.
- Reunión final.

#### 4.1. Introducción y descripción teórica.

De forma previa al desarrollo de la práctica, se hará una exposición del trabajo que se va a desarrollar, analizando las diferentes fuentes de incertidumbre (repetibilidad y sensibilidad) que se van a considerar y su forma de tratamiento. Asimismo se presentará el dispositivo que implementa el fascalio y los diferentes divisores resistivos que se van a emplear. Del mismo modo, se establecerá la caracterización metrológica de ambos elementos.

#### 4.2. Calibración del patrón secundario (patrón de transferencia).

La calibración del patrón secundario será realizada en forma de demostración por el profesor ante todos los asistentes a la práctica. Se realizará en varias fases:

##### 4.2.1. Ajuste del patrón secundario.

Se procederá al ajuste de cero cortocircuitando las entradas y accionando el control correspondiente hasta obtener lectura de cero. Posteriormente se conectará el patrón primario al patrón secundario y se accionará el control de ajuste de fondo de escala hasta obtener lectura unidad, figura 6.

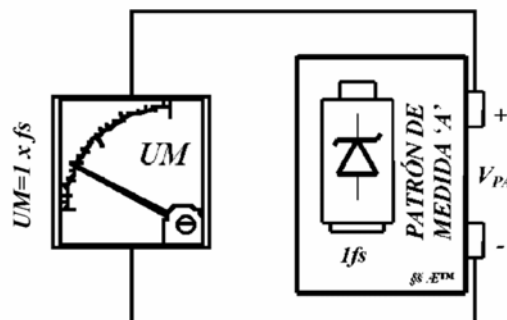


Figura 6. Ajuste de escala del patrón secundario,  $UM=I fs$ .

##### 4.2.2. Calibración del patrón secundario.

La calibración del patrón secundario se realizará con la ayuda de los dispositivos de atenuación, en dos puntos de su escala: 0,5fs y 3fs aproximadamente, figura 7.

En el primer caso se conectará la tensión generada por el patrón primario a los extremos del atenuador  $\eta_1$  y se realizará una lectura con el patrón secundario de la tensión resultante en el punto intermedio. Este proceso se repetirá diez veces obteniendo otras tantas lecturas.

El análisis de incertidumbre es como sigue:

$$D_s = \eta_1 \cdot P - S$$

Aunque lógicamente  $P = 1\text{fs}$  por ser la definición de unidad.

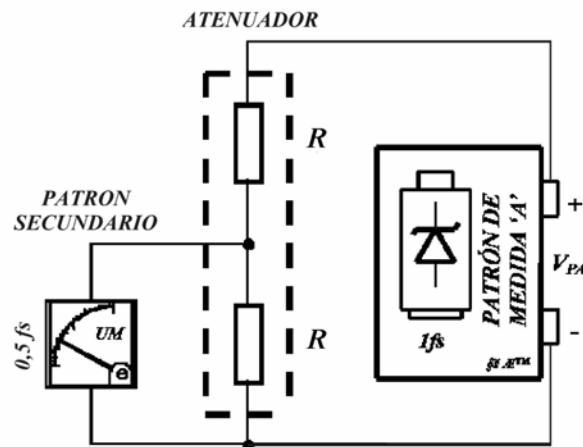


Figura 7. Calibración del patrón secundario en el punto 0,5fs.

La incertidumbre la obtendremos a partir de la propagación de varianzas<sup>2</sup>:

$$S_{D_s}^2 = \eta_1^2 \cdot S_P^2 + S_{\eta_1}^2 + S_S^2$$

donde

$$S_P^2 = \frac{1}{2} U_P^2 \quad ; \quad S_{\eta_1}^2 = \frac{1}{2} U_{\eta_1}^2$$

Por otra parte, con respecto al patrón secundario, sólo consideraremos las contribuciones a la incertidumbre correspondientes a la repetibilidad ( $S_{S_{REPETIBILIDAD}}^2$ ) y la sensibilidad del instrumento ( $S_{S_{SENSIBILIDAD}}^2$ ), dado que son las más relevantes y cuyo origen resulta más intuitivo para el estudiante.

$$S_S^2 = S_{S_{REPETIBILIDAD}}^2 + S_{S_{SENSIBILIDAD}}^2$$

El término de repetibilidad viene asociado a la variación de lecturas obtenidas realizando el experimento (la medida) bajo las mismas condiciones. Se cuantifica como:

<sup>2</sup> A lo largo del texto representaremos la varianza de X por el símbolo  $S_X^2$ .

$$S_{S_{REPETIBILIDAD}}^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (L_k - L_M)^2$$

Siendo N el número de lecturas,  $L_k$  la k-ésima lectura, y  $L_M$  el promedio de las lecturas.

El término de sensibilidad viene asociado al hecho de que el instrumento de medida está limitado en el número de dígitos que puede presentar en su visualizador, lo que de facto conlleva a una indeterminación en los dígitos que no aparecen. La cuantización de este término es:

$$S_{S_{SENSIBILIDAD}}^2 = \frac{1}{12} (VDMS)^2$$

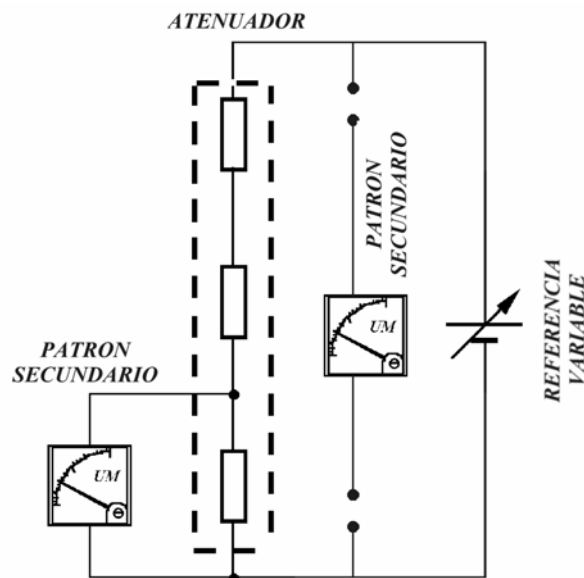
Siendo VDMS el valor en fascalios del dígito menos significativo.

Finalmente,

$$U_{D_s} = 2\sqrt{S_{D_s}^2}$$

Con todo lo anterior se obtendrá un valor de desviación  $D_s$  que habría que sumar a todas las lecturas realizadas con el patrón secundario, y una incertidumbre asociada a la misma. No obstante, y desde el punto de vista docente, resulta más intuitivo aceptar por buenos los resultados directamente leídos del visualizador del instrumento de medida y englobar la desviación en la incertidumbre total. Así finalmente se considerará:

$$U_s = D_s + U_{D_s}$$



**Figura 8.** Calibración del patrón secundario en el punto 3fs.

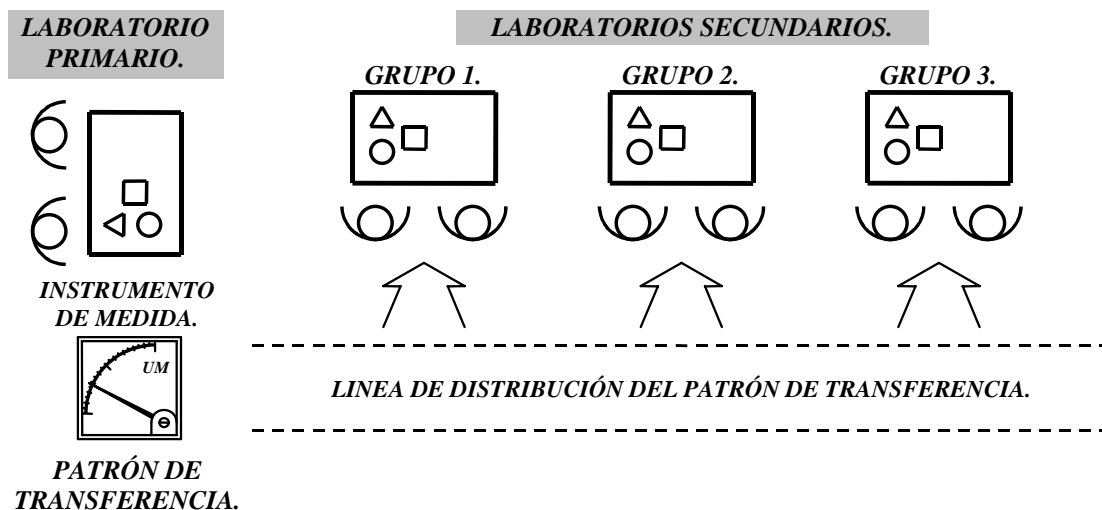
Para la calibración en el otro extremo de la escala se empleará el otro divisor resistivo de la siguiente manera:

Se aplicará una referencia de tensión variable no calibrada entre los extremos del divisor  $\eta_2$ . Con el patrón secundario (que se ha ajustado previamente para dar lectura unidad al ser excitado con un fascalio) se controlará la tensión entre los extremos de la primera resistencia y se irá variando la tensión de la referencia hasta que sobre él se obtenga lectura unidad. Una vez alcanzada esta condición se desconectará el patrón secundario de ese punto y se medirá la tensión generada por la referencia, figura 8. Despreciando, en aras de la simplicidad, la incertidumbre introducida por el patrón secundario cuando está midiendo la tensión en la parte baja del divisor resistivo, podemos aplicar el mismo cálculo de incertidumbre que el expuesto anteriormente para  $\eta_1$ .

Como incertidumbre total del patrón secundario para toda la escala tomaremos la mayor de las dos obtenidas con los dos divisores resistivos.

#### 4.3. Calibración de los patrones terciarios.

Una vez caracterizado el patrón secundario o patrón de transferencia, los diferentes grupos de prácticas harán uso de él, figura 9, para calibrar sus respectivos instrumentos de medida (patrones terciarios) con la ayuda de su referencia variable no calibrada.



*Figura 9. Línea de distribución del denominado 'Patrón de Transferencia' sobre los distintos grupos de laboratorios de calibración secundarios.*

##### 4.3.1. Ajuste del patrón terciario.

El método de ajuste de cero consistirá, como es habitual, en cortocircuitar las entradas y accionar el control correspondiente hasta obtener lectura de cero.

Para el ajuste de fondo de escala, se generará con la referencia variable una tensión que se encuentre próxima al fondo de escala del patrón terciario y se medirá con el patrón secundario. Luego se aplicará esa excitación al patrón terciario y se actuará sobre el control correspondiente hasta obtener la misma lectura.

##### 4.3.2. Calibración del patrón terciario.

La calibración del patrón terciario se hará por comparación directa con el patrón secundario. El método operativo consistirá en generar un valor con la referencia y

medirlo mediante el patrón secundario. Posteriormente se realizará la medición con el patrón terciario y se compararán ambos resultados.

En este caso el análisis de incertidumbre es como sigue:

$$D_T = S - T$$

$$S_{D_T}^2 = S_S^2 + S_T^2$$

$$S_S^2 = S_{S_{REPETIBILIDAD}}^2 + S_{S_{CALIBRACION}}^2$$

donde,

$$S_{S_{CALIBRACION}}^2 = \frac{1}{2} U_S^2$$

siendo  $U_S$  la incertidumbre expandida del patrón secundario obtenida anteriormente por calibración. Finalmente,

$$S_T^2 = S_{T_{REPETIBILIDAD}}^2 + S_{T_{SENSIBILIDAD}}^2$$

El análisis de cada uno de estos términos es similar a lo que se ha expuesto con el patrón secundario.

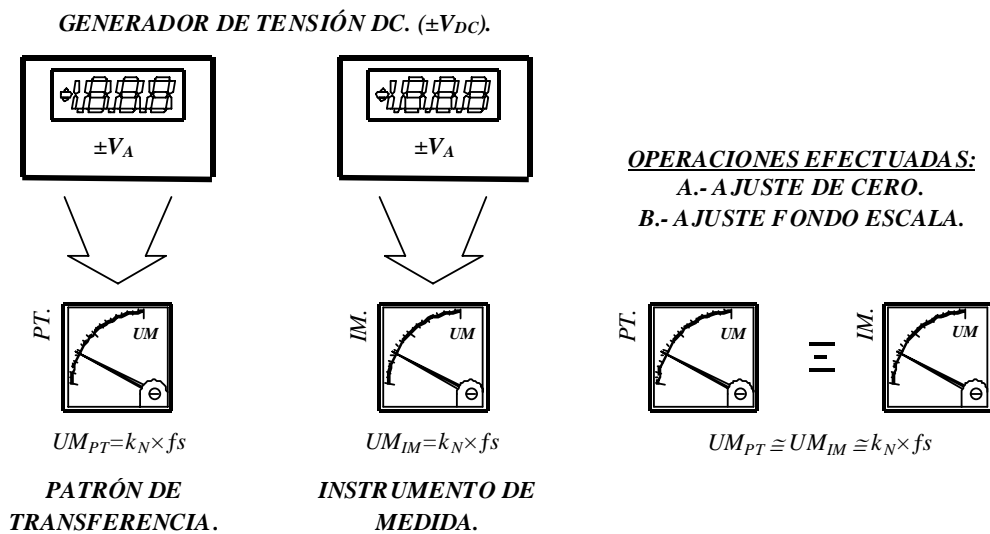


Figura 10. Ejemplo de Calibrado de un instrumento de medida por el método de la comparación directa con el patrón de transferencia asociado.

Resulta interesante sin embargo hacer notar la diferencia en la forma de evaluar ambos términos en función de que se trate de un instrumento de medida con visualización analógica o digital. En el primer caso, el término de repetibilidad es en general pequeño dado que esencialmente la aguja se va a situar en el mismo punto por lo que todas las lecturas son prácticamente idénticas, mientras que la mayor componente de incertidumbre proviene del término de sensibilidad. En este caso:

$$S_{SENSIBILIDAD}^2 = \frac{1}{12} (IND)^2$$

Siendo IND (“intervalo no discernible”) el valor en fascalios del mínimo intervalo para el que sabemos diferenciar si la aguja está situada en su interior o no.

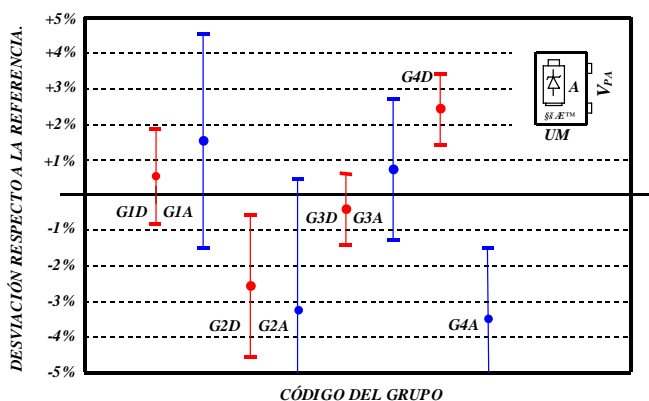
Equivalentemente, la forma de acotar ese intervalo es preguntarse en cuantas partes puedo dividir la escala de forma que pueda decidir en todo momento si la aguja está situada dentro de una u otra. En la evaluación de este término, lógicamente, habrá que tener en cuenta los posibles errores de paralaje, la presencia de un espejo que los minimiza, etc.

Para un instrumento de medida con visualización digital todo esto resulta más sencillo. Por un lado la variación de lecturas será mayor ya que los dígitos menos significativos varían perceptiblemente de una lectura a otra mientras que la contribución de sensibilidad se realizará considerando el valor en fascalios del dígito menos significativo en una forma idéntica a como se expuso en el apartado referente a la calibración del patrón secundario.

Para la obtención numérica del resultado final de la medición y dado que se trata de un número pequeño de puntos de calibración, así como de lecturas tomadas, resulta más instructivo que el estudiante realice los cálculos directamente en el propio laboratorio y ayudado por una calculadora que a través de métodos automatizados como puede ser una hoja de cálculo. En este sentido la tabla 1 nos muestra un posible ejemplo de plantilla de toma de datos y cálculo de resultados parciales y finales.

#### 4.4. Intercomparación.

La parte final de la práctica consistirá en la calibración en el laboratorio primario de forma reservada una referencia con el patrón secundario y posterior circulación entre los diferentes grupos de estudiantes para que la midan, comunicando también de forma reservada su resultado al tutor de la práctica. Una vez recogidos los diferentes resultados se les entregará una hoja en la que se muestre todos los valores, de forma que cada grupo pueda comparar su resultado con el de todos los demás pero sin tener conocimiento del grupo concreto que ha emitido un resultado particular. La práctica finaliza con una reunión en la que se extraen conclusiones sobre los resultados obtenidos.



**Figura 11.-** Intercomparación de los resultados obtenidos por los distintos grupos en el laboratorio

**DATOS DE ENTRADA**

PUNTO 1					
PATRON SECUNDARIO			PATRON TERCIARIO		
(fs)			(fs)		
Lectura 1		Us	Lectura 1		Resolución
Lectura 2			Lectura 2		
Lectura 3			Lectura 3		
Lectura 4			Lectura 4		
Lectura 5			Lectura 5		
Lectura 6			Lectura 6		
Lectura 7			Lectura 7		
Lectura 8			Lectura 8		
Lectura 9			Lectura 9		
Lectura 10			Lectura 10		

PUNTO 2					
PATRON SECUNDARIO			PATRON TERCIARIO		
(fs)			(fs)		
Lectura 1		Us	Lectura 1		Resolución
Lectura 2			Lectura 2		
Lectura 3			Lectura 3		
Lectura 4			Lectura 4		
Lectura 5			Lectura 5		
Lectura 6			Lectura 6		
Lectura 7			Lectura 7		
Lectura 8			Lectura 8		
Lectura 9			Lectura 9		
Lectura 10			Lectura 10		

**CALCULOS INTERMEDIOS**

PUNTO 1						
PATRON SECUNDARIO				PATRON TERCIARIO		
fs	fs <sup>2</sup>	fs <sup>2</sup>	fs <sup>2</sup>	fs	fs <sup>2</sup>	fs <sup>2</sup>
<b>S</b>	<b>S2_REP</b>	<b>S2_CAL</b>	<b>S2_TOTAL</b>	<b>T</b>	<b>S2_REP</b>	<b>S2_SEN</b>
DESVIACION			INCERTIDUMBRE (k=2)			
fs	fs <sup>2</sup>	fs	fs			
<b>DT</b>	<b>S2_DT</b>	<b>U_DT(k=2)</b>	<b>U_T</b>			

PUNTO 2						
PATRON SECUNDARIO				PATRON TERCIARIO		
fs	fs <sup>2</sup>	fs <sup>2</sup>	fs <sup>2</sup>	fs	fs <sup>2</sup>	fs <sup>2</sup>
<b>S</b>	<b>S2_REP</b>	<b>S2_CAL</b>	<b>S2_TOTAL</b>	<b>T</b>	<b>S2_REP</b>	<b>S2_SEN</b>
DESVIACION			INCERTIDUMBRE (k=2)			
fs	fs <sup>2</sup>	fs	fs			
<b>DT</b>	<b>S2_DT</b>	<b>U_DT(k=2)</b>	<b>U_T</b>			

**RESULTADO**

PATRON TERCIARIO				
	fs	fs	U_T (k=2) (fs) para toda la escala	
	T	U_T		
Punto 1				
Punto 2				

*Tabla 1. Ejemplo de plantilla de cálculo de resultados de calibración de los patrones terciarios.*

La realización de esta intercomparación se habrá avisado de forma previa y no debe plantearse como un examen sino como una forma personal de contrastar todo el trabajo desarrollado durante la práctica, figura 11.

## 5. CONCLUSIONES.

En el presente documento se ha pretendido diseñar una práctica de laboratorio que ilustre los diferentes procesos de calibración de los instrumentos de medida, así como familiarizar al estudiante con los conceptos de metrología eléctrica. Aunque resulta necesario que el alumno tenga cierto conocimiento de la estructura interna de los dispositivos que va a utilizar, la práctica no hace mayor hincapié en ellos sino en los aspectos puramente metrológicos que se exponen. De esta forma, se facilita la realización y comprensión de un proceso de calibrado de una manera sencilla y práctica que ayude al mismo tiempo a reforzar los conceptos teóricos expuestos en clase con anterioridad. En ambos casos, se han utilizado para el cálculo de las incertidumbres totales herramientas matemáticas ajustadas al nivel de los estudiantes, intentando con ello evitar que la complejidad de las expresiones y las operaciones a realizar para obtener los resultados desmotiven a los alumnos.

## Referencias.

- [1] Pallás Areny, R. "Sensores y acondicionadores de señal". 3ª Edición. Barcelona, Marcombo S.A.
- [2] Mandado, E. "Instrumentación electrónica". Barcelona, Marcombo S.A., 1995.
- [3] Riu Costa, P.J., Rosell Ferrer, J., Ramos Castro, J. "Sistemas de Instrumentación". Edicions UPC, 1995.
- [4] Stegawski, M. and Schaumann, R. "A New Virtual-Instrumentation-Based Experimenting Environment for Undergraduate Laboratories with Application in Research and Manufacturing." IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vol. 47, nº 6. December, 1998. pp 1503 to 1506.
- [5] Hong Shen, Zheng Xu, B. Dalager, y otros. "Conducting Laboratory Experiments over the Internet." IEEE Transaction on Education. Vol. 42, nº 3. august, 1999. pp 180 to 185.
- [6] ISO/IEC/OIML/BIPM, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.", International Organization for Standardization (ISO). Geneva, 1995. Switzerland.
- [7] EA-4/02, "Expressions of the Uncertainty of Measurement in Calibration.". 1<sup>st</sup> Edition. Requirements document, European Cooperation for Accreditation. Utrecht, 1996. Netherlands.
- [8] Wolfgang Kessel, "Measurement uncertainty according to ISO/BIPM-GUM." Thermochemica Acta 382. June 2002. Pp 1 to 16.
- [9] Arcega Solsona, F.J. "Unidades de medida". Prensas Universitarias de Zaragoza, 1995.
- [10] "International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology.", International Organization for Standardization (ISO). Geneva, 1994. Switerland.
- [11] Sergio Franco, "Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits", Mcgraw-Hill International Editions. Series in Electrical Engineering. 1988.