



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Desarrollo de protocolo de calibración para
equilibradoras horizontales de ejes y
componentes ferroviarios**

Autor:

Diez García, Germán

Tutora:

**del Val Puente, Lara
Dpto. CMelM**

Valladolid, noviembre 2015.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

RESUMEN GENERAL

TITULO: Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios.

AUTOR: Diez García, Germán.

TUTORA: Del Val Puente, Lara.

FACULTAD: Escuela de Ingenierías Industriales.

DIRECTOR: Pisano Alonso, Jesús Ángel.

RESUMEN

Se ha procedido al estudio y análisis del funcionamiento de las máquinas equilibradoras horizontales de eje rígido junto con un análisis e interpretación de los valores de desequilibrio.

En el proceso, se ha realizado el análisis y adaptación de la Norma ISO 2953 desarrollando métodos para saber si los resultados obtenidos en los ensayos responden a valores de exactitud y a precisión en el estudio de las máquinas equilibradoras. Posteriormente se ha llevado a cabo un protocolo de calibración a partir de los resultados obtenidos para obtener el valor más probable de la medida.

Todo el proceso, ha sido recogido para la comprobación metrológica de las máquinas equilibradoras horizontales, que se utilizan para el equilibrado de ejes ferroviarios y otros componentes como ventiladores y árboles cardan. También se recoge el resto de documentación para el desarrollo de un adecuado proceso de calibración como son hojas de cálculo con sus correspondientes resultados e información técnica adicional.

PALABRAS CLAVE:

Máquinas equilibradoras.

Desequilibrio.

Exactitud y precisión.

Calibración.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

OVERVIEW

TITLE: Calibration protocol for horizontal balancing machines in rail axis and components.

AUTHOR: Germán Diez García.

TUTOR: del Val Puente, Lara.

FACULTY: School of Industrial Engineering.

HEAD TEACHER: Pisano Alonso, Jesús Ángel.

ABSTRACT

We proceeded to the study and analysis of the operation of the horizontal balancing machines rigid axle with an analysis and interpretation of the unbalance values.

In the process, it has made the analysis and adaptation of ISO 2953 to develop methods to determine if the results meet the tests of accuracy and precision values in the study of balancing machines. Subsequently it carried out a calibration protocol from the results for the most likely value of the measure.

The whole process has been collected for testing metrological horizontal balancing machines, which are used for balancing railways and other components such as fans and cardan shafts. The other documents for the development of a suitable calibration process are also collected as spreadsheets with its results and additional technical information.

KEYWORDS:

Balancing machines.

Imbalance.

Accuracy and precision.

Calibration.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

INDICE

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	17
1.1 INTRODUCCIÓN	17
1.2 OBJETIVO GENERAL	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2 MARCO TEÓRICO	19
2.1 CONCEPTOS	19
2.2 DESEQUILIBRIO	21
2.2.1 EFECTOS DEL DESEQUILIBRIO	22
2.2.2 DESEQUILIBRIO ESTÁTICO	23
2.2.3 DESEQUILIBRIO DINÁMICO	23
2.3 MODELOS DE EQUILIBRADO	25
2.4 ROTORES CON UN PLANO DE CORRECCIÓN	26
2.5 ROTORES CON DOS PLANOS DE CORRECCIÓN	26
2.6 ROTORES DESPIEZABLES	27
2.7 DESALINEAMIENTO	27
2.8 FALTA DE AJUSTE EN LAS UNIONES MECÁNICAS	29
2.9 PARTES DE UNA EQUILIBRADORA	30
2.10 CLASIFICACIÓN DE LOS ROTORES	37
2.11 VELOCIDAD DE ROTACIÓN	39
2.12 PARÁMETROS DEL EQUILIBRADO	40

3 DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN	43
3.1 TIPOS DE EQUILIBRADORAS DE TRABAJO	44
3.1.1 EQUILIBRADORA UTILIZADA EN EL PROCESO	47
3.2 FACTORES A TENER EN CUENTA EN EL PROCESO	48
3.2.1 CONSERVACIÓN DE LAS MÁQUINAS EQUILIBRADORAS	48
3.2.2 CUALIFICACIÓN DEL PERSONAL	49
3.2.3 CONDICIONES AMBIENTALES	49
3.3 PATRONES NECESARIOS	50
3.3.1 CONDICIONES DE ESTADO DEL ROTOR PATRÓN	52
3.4 COMPROBACIÓN DE LOS DESEQUILIBRIOS	53
3.4.1 CATEGORÍAS Y DIAGRAMA DEL GRADO DE CALIDAD	53
3.4.2 PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN DE LOS DESEQUILIBRIOS	56
3.4.3 COMPROBACIÓN DE LA EXACTITUD. TEST $U_{MAR.}$	64
3.4.4 COMPROBACIÓN DE LA PRECISIÓN. TEST $U_{RR.}$	70
3.4.5 RESULTADOS DEL PROCESO	75
4 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CONFIRMACIÓN METROLÓGICA, CALIBRACIÓN.	77
4.1 OBTENCIÓN DEL VALOR MÁS PROBABLE.	78
4.2 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA	79
4.2.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA K	80
4.2.2 INCERTIDUMBRE TÍPICA COMBINADA	81
4.3 RELACIÓN ENTRE TOLERANCIA E INCERTIDUMBRE	86



5 INFORME PARA LA TOMA DE DATOS IN SITU	89
6 CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA EQUILIBRADORA	97
7 CONCLUSIONES	105
8 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO	107
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	110
ANEXO 1. CALIBRACIÓN DE LA BALANZA DE PRECISIÓN.	110
ANEXO 2. CALIBRACIÓN DE LAS MASAS DEL ROTOR.	115



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DESEQUILIBRIO GENERADO POR UNA MASA.....	21
FIGURA 2. EFECTOS GENERADOS POR UN DESEQUILIBRIO EN EL ROTOR.....	22
FIGURA 3. DESEQUILIBRIO ESTÁTICO.....	23
FIGURA 4. DESEQUILIBRIO DINÁMICO.....	23
FIGURA 5. ROTOR EQUILIBRADO ESTÁTICAMENTE Y DESEQUILIBRADO DINÁMICAMENTE.	24
FIGURA 6. EFECTO QUE GENERA UN ROTOR CON DESEQUILIBRIO DINÁMICO.	24
FIGURA 7. EQUILIBRADORA CON DOS PLANOS DE CORRECCIÓN.....	26
FIGURA 8. FORMA DE DESALINEAMIENTO INTERNO DE UN EJE.....	28
FIGURA 9. FORMA DE DESALINEAMIENTO PARALELO DE UN EJE.....	28
FIGURA 10. FORMA DE DESALINEAMIENTO ANGULAR DE UN EJE.....	29
FIGURA 11. CONJUNTO MÁQUINA EQUILIBRADORA 1.....	30
FIGURA 12. CONJUNTO MÁQUINA EQUILIBRADORA 2.....	32
FIGURA 13. SOPORTE PRINCIPAL DE LOS APOYOS.....	33
FIGURA 14. PUNTOS DE SUJECIÓN DEL ROTOR CON LOS RODILLOS EN EL SOPORTE 1.	34
FIGURA 15. SOPORTE CONTENEDOR DE LOS RODILLOS.	35
FIGURA 16. PUNTOS DE SUJECIÓN DEL ROTOR CON LOS RODILLOS EN EL SOPORTE.....	35
FIGURA 17. SOPORTE CONTENEDOR DE LOS RODILLOS.	36
FIGURA 18. TIPO PARTICULAR DE SOPORTE DEL ROTOR.....	36
FIGURA 19. TIPO PARTICULAR DE SOPORTE DEL ROTOR 2.....	37
FIGURA 20. ROTOR TIPO A SEGÚN ISO 2953.	37
FIGURA 21. ROTOR TIPO B SEGÚN ISO 2953.....	38
FIGURA 22. ROTOR TIPO C SEGÚN ISO 2953.	38
FIGURA 23. PARÁMETROS DEL EQUILIBRADO.....	41
FIGURA 24. EQUILIBRADORA KAISER RM 3000.2.....	44
FIGURA 25. EQUILIBRADORA SCHENCK KHGW 20-B.....	45
FIGURA 26. EQUILIBRADORA HOFMANN HL-25.....	46

FIGURA 27. EQUILIBRADORA KAISER RM300.2 UTILIZADA PARA EL ESTUDIO DEL AJUSTE.....	47
FIGURA 28. ROTOR PATRÓN.....	50
FIGURA 29. JUEGO DE MASAS PATRONES.....	50
FIGURA 30. ROTOR PATRÓN A TENER EN PERFECTO ESTADO DE CONSERVACIÓN.....	52
FIGURA 31. DIAGRAMA DEL GRADO DE CALIDAD.....	55
FIGURA 32. ROTOR UTILIZADO TIPO B PARA EL TEST U _{MAR}	64
FIGURA 33. DATOS GEOMÉTRICOS DEL ROTOR TIPO B.....	65
FIGURA 34. COLOCACIÓN DE LA MASA PATRÓN DE DESEQUILIBRIO PARA EL TEST U _{MAR}	67
FIGURA 35. COLOCACIÓN DE LAS MASAS PATRONES FIJOS Y MÓVILES PARA EL TEST U _{RR}	71
FIGURA 36. MAQUINA EQUILIBRADORA UTILIZADA PARA LA EJECUCIÓN DEL TEST U _{MAR} Y U _{RR}	75
FIGURA 37. DISTRIBUCIÓN RECTANGULAR EN EL REDONDEO DEL EQUIPO. .	83
FIGURA 38. EFECTO DE LA DERIVA EN EL TIEMPO.....	84
FIGURA 39. TIPOS DE TOLERANCIAS EXISTENTES EN EL PROCESO.....	86
FIGURA 40. PORTADA INFORME DE CALIBRACIÓN MÁQUINA EQUILIBRADORA KAISER.....	98
FIGURA 41. CONTRAPORTADA INFORME DE CALIBRACIÓN MÁQUINA EQUILIBRADORA KAISER.....	99
FIGURA 42. PORTADA PARA EL INFORME DE CALIBRACIÓN DE LA BALANZA DE PRECISIÓN.....	111
FIGURA 43. PORTADA PARA EL INFORME DE CALIBRACIÓN DE LAS MASAS DE LA EQUILIBRADORA.....	116

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. MODELOS DE EQUILIBRADO.	25
TABLA 2. PARÁMETROS DE TRABAJO ESENCIALES EN EL EQUILIBRADO.....	40
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS EQUILIBRADORA KAISER RM 3000.2	44
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS EQUILIBRADORA SCHENCK KHGW 20-B	45
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS EQUILIBRADORA HOFMANN HL-25	46
TABLA 6. MASAS PATRONES CON LAS QUE SE CREARÁ UN DESEQUILIBRIO CONOCIDO.	51
TABLA 7. ELEMENTOS ROTATIVOS O MÁQUINAS EN FUNCIÓN DE LOS NIVELES DEL GRADO DE CALIDAD DE EQUILIBRADO.	53
TABLA 8. PLANTILLA COMPROBACIÓN SEGÚN ISO 2953	58
TABLA 9. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y TÉCNICOS DEL TIPO DE ROTOR.....	65
TABLA 10. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DEL TEST UMAR.....	68
TABLA 11. GRÁFICO DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TEST UMAR.	69
TABLA 12. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DEL TEST URR.....	72
TABLA 13. GRÁFICO DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TEST URR.	73
TABLA 14. T-STUDENT PARA LA OBTENCIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA. ..	80
TABLA 15. VALORES SEGÚN CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LAS MASAS PATRONES.	84
TABLA 16. INCERTIDUMBRES DESARROLLADAS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN.....	85
TABLA 17. TIPOS DE TOLERANCIAS Y RELACIÓN.....	87
TABLA 18. TOMA DE DATOS PARA LA MASA PATRÓN DE 65 G EN EL PLANO 1.	91
TABLA 19. TOMA DE DATOS PARA LA MASA PATRÓN DE 65 G EN EL PLANO 2.	92
TABLA 20. TOMA DE DATOS PARA LA MASA PATRÓN DE 136 G EN EL PLANO 1.	93
TABLA 21. TOMA DE DATOS PARA LA MASA PATRÓN DE 136 G EN EL PLANO 2.	94
TABLA 22. TOMA DE DATOS PARA LA MASA PATRÓN DE 680 G EN EL PLANO 1.	95
TABLA 23. TOMA DE DATOS PARA LA MASA PATRÓN DE 680 G EN EL PLANO 2.	96

TABLA 24. RESULTADOS DEL INFORME DE CALIBRACIÓN PARA EL PLANO 1.	100
TABLA 25. RESULTADOS DEL INFORME DE CALIBRACIÓN PARA EL PLANO 2.	101
TABLA 26. INFORME DE CALIBRACIÓN PARA LA BALANZA DE PRECISIÓN POR LOS MÉTODOS DE LA EMPRESA.	112
TABLA 27. PROCEDIMIENTO DEL EFECTO DE DESCENTRAMIENTO DE LA BALANZA POR MÉTODO PROPUESTO.	113
TABLA 28. INFORME DE CALIBRACIÓN PARA LA BALANZA DE PRECISIÓN POR MÉTODO PROPUESTO.	114
TABLA 29. INFORME DE CALIBRACIÓN PARA LA MASA DE 65 G.	117
TABLA 30. INFORME DE CALIBRACIÓN PARA LA MASA “A” DE 136 G.	118
TABLA 31. INFORME DE CALIBRACIÓN PARA LA MASA “B” DE 136 G.	119
TABLA 32. INFORME DE CALIBRACIÓN PARA LA MASA DE 680 G.	120

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Por equilibrado se entiende el perfeccionamiento de la distribución de la masa de un cuerpo en rotación de forma que éste gire en sus apoyos sin estar sometido a fuerzas centrífugas descompensadas y los cojinetes o rodamientos no sean solicitados por fuerzas periódicas de carácter giratorio.

En el mundo laboral, un gran porcentaje de los elementos mecánicos que son empleados para diferentes fines requieren de un equilibrado previo para garantizar un mayor nivel de calidad y disminuir así el desequilibrio.

Los instrumentos modernos que se utilizan para equilibrar permiten reducir considerablemente los límites hasta los que es posible medir y con ello también eliminar los desequilibrios más pequeños. Sin embargo, es necesario plantearse hasta qué punto es necesario eliminar los desequilibrios o dónde se encuentra el valor óptimo del desequilibrio económicamente y tecnológicamente hablando. Aquí se tiene en cuenta la relación calidad-precio propia de cada empresa que supondrá que niveles de desequilibrios se podrán considerar como óptimos o tolerables.

Hay que garantizar que la equilibradora esté ajustada, es decir, que la toma de medidas del desequilibrio es la correcta y está dentro de unos rangos previamente establecidos. Para ello, este procedimiento de ajuste y calibración de la medida estará recogido en el desarrollo de este documento.

Este trabajo, se ha podido llevar a cabo gracias al apoyo y los conocimientos recibidos en las prácticas en empresa realizadas en **RENFE Fabricación y Mantenimiento**, donde he podido manejar equilibradoras para su estudio y ampliar mi capacidad tanto teórica como prácticas realizando pruebas y ensayos de este tipo de máquinas para determinar los posibles desequilibrios existentes.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general es adaptar la norma ISO 2953 al estudio del desequilibrio y diseñar, desarrollar e implementar un protocolo de calibración de las máquinas equilibradoras. Todo ello, definiendo un procedimiento y pautas para el correcto equilibrado de las máquinas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desarrollar y fijar desde un marco teórico todos aquellos conocimientos relacionados con las máquinas equilibradoras y su funcionamiento.

Análisis y adaptación de la Norma ISO 2953 (*Mechanical vibration – Balancing machines – Description and evaluation*. “Vibraciones mecánicas – Máquinas equilibradoras – Descripción y evaluación”) a las máquinas equilibradoras, aclarar el fin de esta norma y los resultados que se han obtenido aplicando los procedimientos recogidos en la misma aplicando el test U_{MAR} y el test U_{RR} .

Diseñar e implementar un protocolo de calibración propio para la comprobación y confirmación metrológica de las máquinas equilibradoras horizontales de ejes rígidos atendiendo a los procedimientos de calibración establecidos. Este documento, recogerá las pautas para comprobar que las equilibradoras proporcionan valores que se encuentran dentro de un rango establecido.

Crear documentación y plantillas durante el estudio del equilibrado como apoyo para la recopilación de información y datos técnicos.

Poder realizar pruebas y ensayos para poder comprobar el correcto funcionamiento de la máquina y plasmarlo en las hojas de cálculo y archivos originados para obtener los resultados de las calibraciones.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS

Equilibrado:

Técnica que consiste en perfeccionar la distribución de la masa de un cuerpo en rotación de forma que éste gire en sus apoyos sin estar sometidos a fuerzas centrífugas descompensadas y los cojinetes o rodamientos no sean solicitados por fuerzas periódicas de carácter giratorio.

Equilibradora:

Máquina que permite determinar el desequilibrio de masas rotativas y aplicarles la corrección necesaria para hacer que giren sin vibraciones.

Partes principales de una máquina equilibradora	
Apoyos	Todas las fuerzas externas (peso propio, fuerzas centrífugas, fuerzas transmitidas por engranajes, etc.) deberán equilibrarse con las reacciones correspondientes. Estas reacciones son transmitidas al rotor a través de los apoyos (cojinetes, rodamientos, etc.).
Eje de rotación	El eje de rotación o eje físico, es el eje de referencia del estado de equilibrio de un rotor. Está formado por la línea que une los centros de las secciones situados en los centros de los apoyos.
Plano de corrección	Plano perpendicular al eje de rotación y en el que añadiendo, retirando o desplazando masas de corrección es posible mejorar el estado de equilibrado del rotor. Los rotores rígidos tienen, dependiendo de su forma y extensión axial, uno, dos o incluso tres planos de corrección.
Rotor	Pieza de una máquina que gira durante el servicio entorno a un eje determinado, el denominado eje de rotación.
Soporte	El soporte fija la máquina con el suelo o con el chasis del elemento.

Desequilibrio:

El desequilibrio es el producto de una masa situada fuera del eje de rotación de un rotor por el radio o distancia desde este eje al centro de gravedad de dicha masa por la masa del rotor (*Ver figura 1*). Como unidad de desequilibrio se recomienda: g·mm (kg·μm).

Un desequilibrio (U) en una pieza girando a una cierta velocidad de rotación (ω), provoca sobre la pieza una fuerza centrífuga (F).

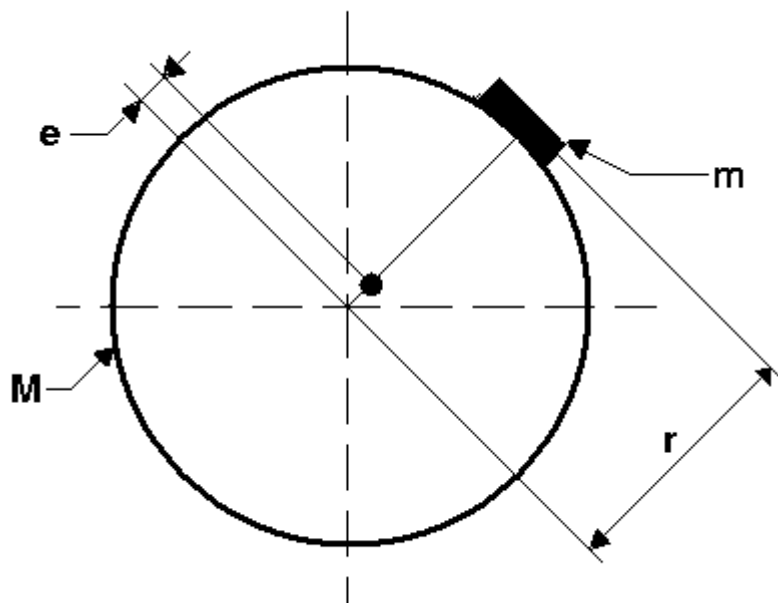
Parámetros principales del desequilibrio	
Ángulo de desequilibrio	El ángulo de un desequilibrio es el ángulo al que se encuentra el desequilibrio siempre medido desde una posición de referencia en el rotor.
Par de desequilibrio	El par de desequilibrio es el momento de fuerza que se ejerce sobre el eje de rotación cuándo se transmite la potencia.
Momento de desequilibrio	Momento del par de desequilibrio es una magnitud vectorial que tiene por módulo el producto de las fuerzas por la distancia al eje del centro de giro. $M = F \cdot r = m \cdot g \cdot r \quad (\text{EC. 1})$
Resultante de desequilibrio	Es la posición y cantidad de desequilibrio que se ha generado sobre la pieza a estudiar.

2.2 DESEQUILIBRIO

El desequilibrio es el resultado originado en las máquinas equilibradoras cuando durante el proceso de ejecución el eje de rotación no coincide con el eje principal de inercia. En muchos casos, el desequilibrio es consecuencia de una desigualdad entre fuerzas centrífugas debidas a la rotación. La fuente de vibración del rotor puede ser también un desequilibrio por empuje generado por el rotor y la gravedad.

Para un rotor equilibrado la masa se encuentra en el centro del apoyo (en nuestro eje de rotación). Cuando se introduce en el sistema un desequilibrio, el centro de gravedad del rotor se mueve alejado del centro del rodamiento. Se define este desequilibrio como el producto de la masa que produce el desequilibrio por la distancia del mismo al eje de rotación (radio) o como la masa del rotor por la excentricidad (Ver ecuación 2).

Figura 1. Desequilibrio generado por una masa.



$$\text{Desequilibrio} = m \cdot r = e \cdot M \quad (\text{EC.2})$$

“M” = masa del rotor.

“m” = masa que provoca el desequilibrio.

“e” = excentricidad.

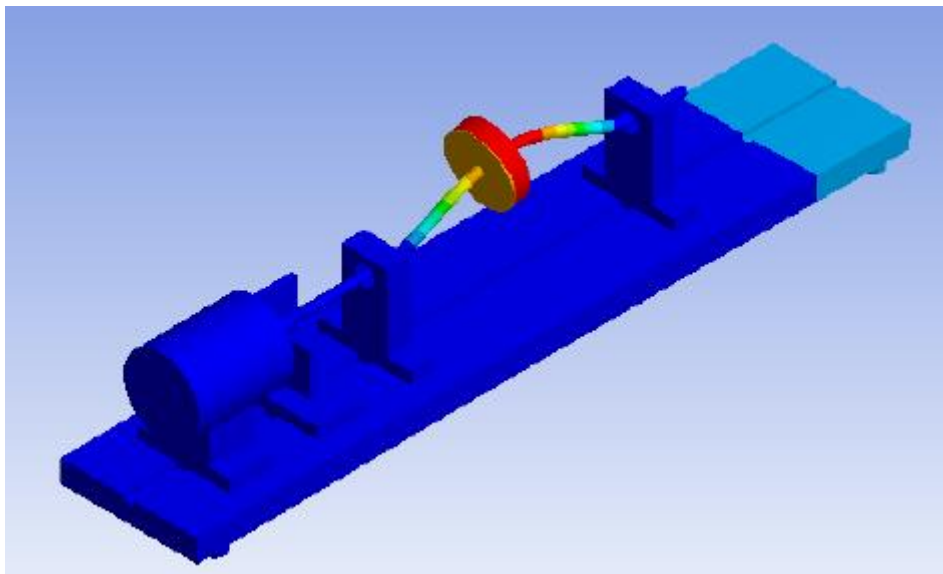
“r” = distancia del dentro del rotor a la posición del peso.

2.2.1 EFECTOS DEL DESEQUILIBRIO

Los desequilibrios en un rotor se pueden manifestar, por un lado, en fuerzas en los apoyos y, por otro, en vibraciones de la máquina con una frecuencia igual a la de giro de los desequilibrios. Ambos efectos dependen, entre otro, esencialmente de las proporciones geométricas y de la distribución de masas del rotor y la máquina, así como de la rigidez de los apoyos.

En general, la resultante del desequilibrio tiene una importancia más primordial que el par de desequilibrio; es decir, dos masas que generen desequilibrios del mismo sentido, perturban generalmente más que dos en sentido opuesto (**desequilibrio estático**). Sin embargo existen también casos donde es justo el par de desequilibrio el que provoca efectos especialmente indeseados (**desequilibrio dinámico**).

Figura 2. Efectos generados por un desequilibrio en el rotor.

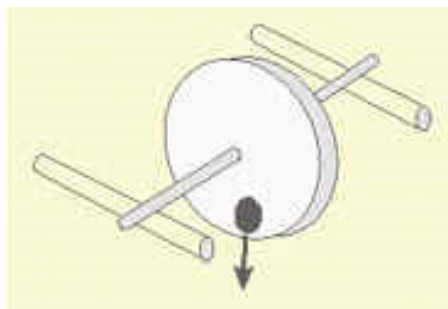


[ELKIN 2011]

2.2.2 DESEQUILIBRIO ESTÁTICO

El **desequilibrio estático** se puede determinar colocando el rotor sobre unos apoyos y dejar que gire libremente hasta su posición de equilibrio (Ver figura 3), hasta que la parte más pesada del conjunto del rotor quede en la parte inferior y por el contrario la parte menos pesada se situará en la zona superior por efecto de la gravedad.

Figura 3. Desequilibrio estático.



[APUCA]

2.2.3 DESEQUILIBRIO DINÁMICO

El **desequilibrio dinámico** es aquel que se origina cuando el sistema está girando debido al par de rotación generado, por lo que es necesario realizar el proceso utilizando una máquina equilibradora (Ver figura 4).

Este proceso de equilibrado se reparte en dos planos donde se situarán los sensores en los apoyos para medir las fuerzas ejercidas por el desequilibrio.

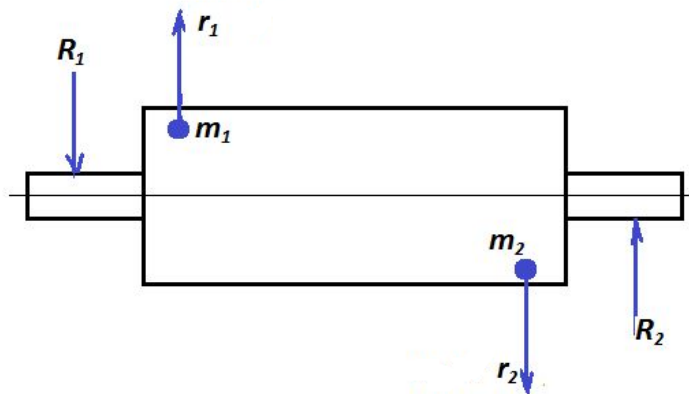
Figura 4. Desequilibrio dinámico.



Aunque se realice un correcto equilibrado estático, cuando se pone en servicio el rotor puede estar sometido a fuertes desequilibrios dinámicos y originarse grandes vibraciones, por lo que equilibrar estáticamente no siempre es suficiente.

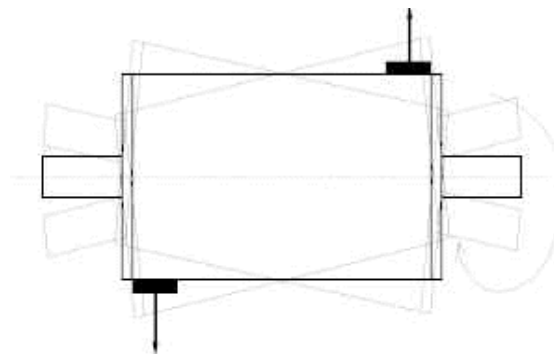
Entonces, se puede deducir de todo lo tratado que; un equilibrado estático no siempre es suficiente para un rotor y que normalmente se deberá realizar un equilibrado dinámico.

Figura 5. Rotor equilibrado estáticamente y desequilibrado dinámicamente.



En la *figura 5* se muestra como un rotor puede estar equilibrado estáticamente y desequilibrado dinámicamente, en este ejemplo se puede observar, que el rotor con sus masas correspondientes está equilibrado estáticamente ya que están desfasadas 180° y los pesos serán iguales o $m_2 > m_1$, pero si se hace girar al rotor se producirán fuertes desequilibrios residuales debido a la fuerza que genera cada peso como se muestra en la *figura 6*, por lo tanto un rotor con esta distribución no estará equilibrado dinámicamente.

Figura 6. Efecto que genera un rotor con desequilibrio dinámico.



[ELETTORAVA]

2.3 MODELOS DE EQUILBRADO

Los desequilibrio originados, por lo general se suelen equilibrar en dos planos, aunque atendiendo a una serie de relaciones de parámetros geométricos y a la velocidad de giro, el número de planos para equilibrar un rotor puede variar en un plano o incluso tres planos.

Existen numerosas maneras de clasificar los tipos de equilibrado. Una de ellas, es poder definir el modelo de equilibrado apropiado en relación L/D de un rotor, donde:

- L = Longitud del cuerpo del rotor.
- D = Diámetro del cuerpo del rotor.

Como se muestra en la *tabla 1*, donde en función del tipo de rotor y la velocidad de giro durante el proceso se puede determinar el número de planos en los que se va a realizar el equilibrado.

Tabla 1. Modelos de equilibrado.

MODELO ROTOR	RELACIÓN L/D	MODELOS DE EQUILBRADO		
		UN PLANO	DOS PLANOS	MÚLTIPLES PLANOS
	Menor que 0,5	Hasta 1000 rpm	Superior a 1000 rpm	NO
	Mayor que 0,5 y menor que 2	Hasta 150 rpm	150 - 2000 rpm Superior a 70% Vel. Crítica	Superior a 2000 rpm Superior a 70% Vel. Crítica
	Mayor que 2	Hasta 100 rpm	Superior a 100 rpm y Hasta el 70% Vel. Crítica	Superior a 70% Vel. Crítica

2.4 ROTORES CON UN PLANO DE CORRECCIÓN

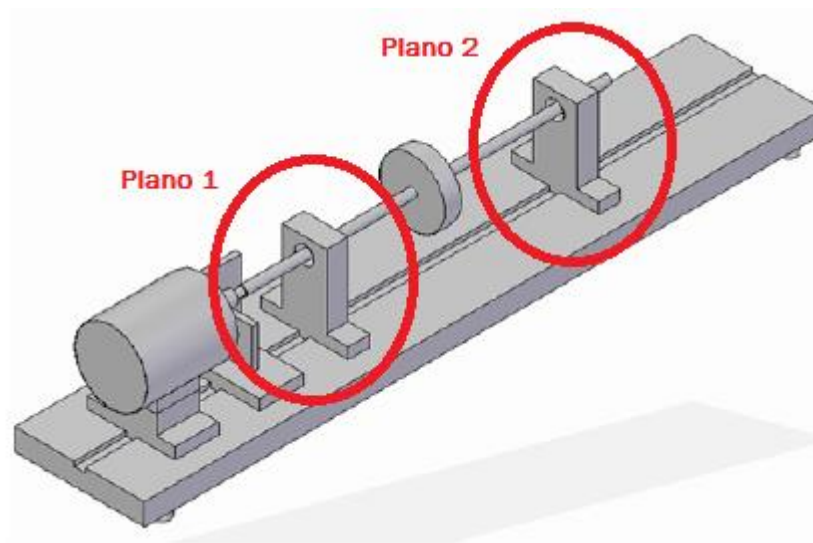
En el caso de rotores con forma de disco, basta generalmente con equilibrar en un plano, siempre que sea lo suficientemente grande la distancia entre apoyos y el disco y este sea perpendicular respecto al eje de rotación.

Cuando L/D sea menor que 0,5, el estudio de equilibrado únicamente se podrá realizar mediante uno o dos planos de corrección, quedando excluido la utilización de un tercer plano en estos casos. El cumplimiento de estas condiciones deberá investigarse para cada caso particular (ver apartado 2.3).

2.5 ROTORES CON DOS PLANOS DE CORRECCIÓN

Si no se cumple la condición enunciada en el apartado 2.4 para un rotor tipo L/D menor que 0,5 (Ver tabla 1), entonces es preciso equilibrar en dos planos diferentes (este procedimiento se denomina también equilibrado dinámico como ya vimos anteriormente en el apartado 2.2.3). Mientras que en el equilibrado estático el desequilibrio puede determinarse dejando que oscile el rotor en el campo gravitatorio, para el equilibrado dinámico (Ver figura 7) deberá girar el rotor sobre una máquina equilibradora, ya que por el contrario, no sería apreciable el momento de desequilibrio.

Figura 7. Equilibradora con dos planos de corrección.



[ELKIN 2011]

2.6 ROTORES DESPIEZABLES

Es necesario equilibrar tanto los rotores de una sola pieza como los rotores despiezables. Al ensamblar dos partes no solo se suman vectorialmente los desequilibrios individuales de cada una, sino que aparecen desequilibrios adicionales causados porque las partes pueden haber sido montadas en otra posición dentro de las tolerancias de ajuste del conjunto diferente a las del dispositivo idóneo.

Tales desplazamientos pueden surgir tanto por juego radial y error de excentricidad como por juego axial. Por ello, a la hora de fijar los desequilibrios admisibles para piezas individuales es preciso considerar que la suma de los desequilibrios individuales y de los desequilibrios condicionados por el ajuste no debe ser mayor que el desequilibrio admisible correspondiente a la calidad de equilibrado exigida para el conjunto:

$$\text{Deseq. Piezas individuales} + \text{Deseq. Debido a ajuste} \leq \text{Deseq. admisible total} \quad (\text{EC. 3})$$

Por lo tanto, es necesario obtener a una relación dimensional correcta entre los desequilibrios de las piezas y los desequilibrios causados por el ajuste. Si no es posible alcanzar la calidad de equilibrado exigida para un conjunto equilibrando las piezas individuales, entonces es necesario equilibrar el conjunto ensamblado.

2.7 DESALINEAMIENTO

El desalineamiento es el resultado de la desviación del **eje conducido o del rotor** con el **eje conductor o del motor** en el proceso de sujeción, cuando ambos deberían ser colineales para evitar que se generen así vibraciones y con ello un desequilibrio.

El desalineamiento, también puede producirse por una falta de ajuste de los apoyos de la máquina equilibradora al estar a distinto nivel dando lugar a que el rotor no apoye de forma horizontal y el peso de este no se reparta de manera homogénea sobre los apoyos.

Por lo tanto, los desalineamientos son considerados fallos en el posicionamiento o en el diseño de los elementos que se deberá intentar evitar.

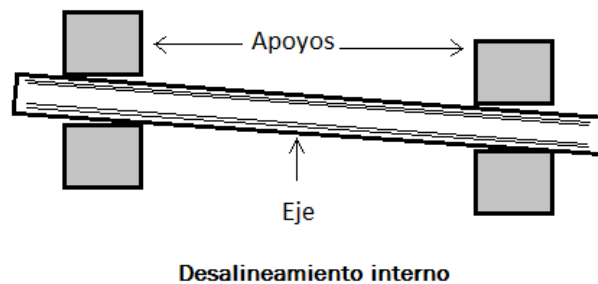
Se puede distinguir tres tipos de desalineamientos:

- **Desalineamiento interno:**

Es el desalineamiento que viene determinado por un desajuste en los apoyos. Esto, supone un incorrecto posicionamiento del eje conducido debido a que no apoya uniformemente y el reparto de peso no se distribuye homogéneamente.

Este inconveniente, originará unas fuerzas centrífugas cuando se somete el proceso a una determinada velocidad de giro, que darán lugar a vibraciones y a un desequilibrio indeseado, por lo tanto el ajuste no será el correcto. [HELKIN 2011].

Figura 8. Forma de desalineamiento interno de un eje.

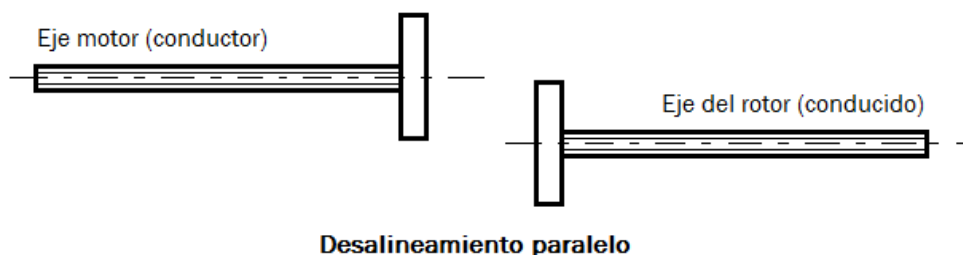


- **Desalineamiento paralelo:**

Es el desalineamiento que viene determinado por un desajuste en la posición del eje conductor (eje motor) y el eje conducido (eje del rotor) y dejar de ser colineales entre sí, pero ambos siguen manteniendo un paralelismo.

Este inconveniente, se atribuye a la existencia de una determinada excentricidad o distancia entre ejes que originará un desequilibrio, por lo que el ajuste no será el correcto. [HELKIN 2011].

Figura 9. Forma de desalineamiento paralelo de un eje.

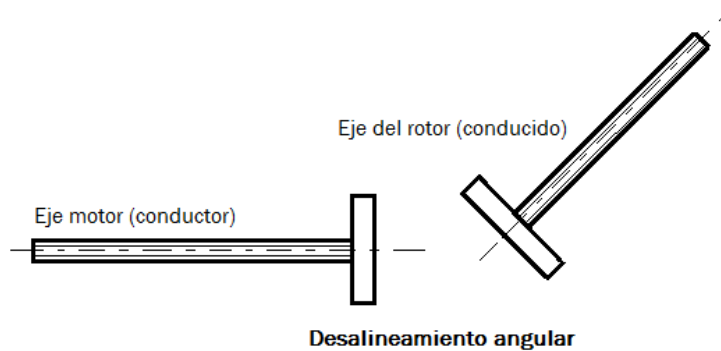


- **Desalineamiento angular:**

Es el desalineamiento que viene determinado por un desajuste en la posición de los ejes principales entre el conductor (eje motor) y el conducido (eje del rotor) debido a que estos dejarán de ser paralelos entre sí.

Este inconveniente, puede ser debido a un incorrecto amarre de la pieza o a imperfecciones de los elementos de unión que originan grandes vibraciones y desequilibrios iniciales. [HELKIN 2011].

Figura 10. Forma de desalineamiento angular de un eje.



Estos tipos de desalineamientos, son muy perjudiciales en el proceso de equilibrado por lo que se deberá evitar. Para ello antes de comenzar a equilibrar el operario deberá asegurarse de que todas las sujeciones son correctas, realizar una inspección visual y poner en marcha la máquina a baja velocidad para garantizar que no existen desajustes.

2.8 FALTA DE AJUSTE EN LAS UNIONES MECÁNICAS

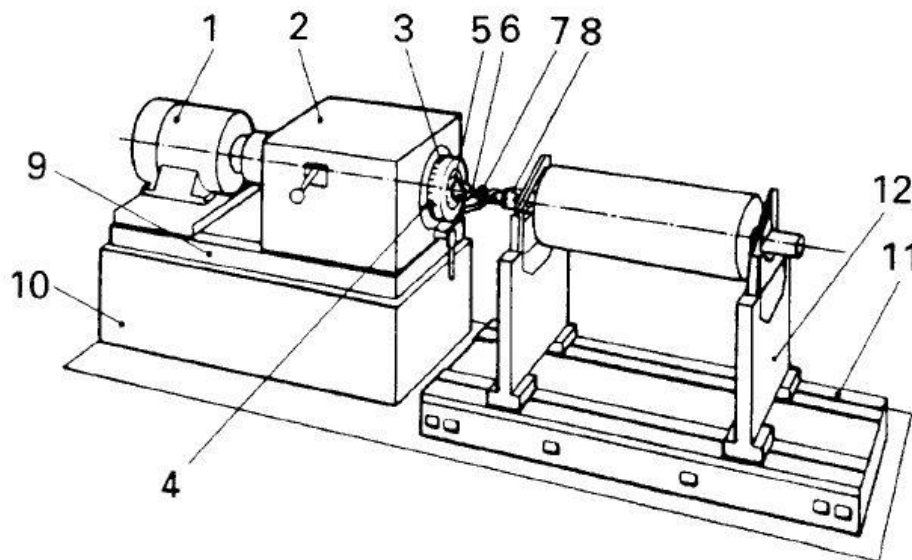
Las diferentes formas de manifestarse el juego en las uniones mecánicas tienen lugar como resultado del deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos que han excedido las tolerancias de holgura o sencillamente se han aflojado debido a la dinámica de la operación de la máquina. Las vibraciones que originan las solturas en las uniones mecánicas, son producidas por las fuerzas de excitación generadas por otros problemas, tales como el desequilibrio o el desalineamiento del elemento que se quieren equilibrar. Esta falta de ajuste puede generar problemas en las zonas de unión entre dos o más piezas como por ejemplo; la unión del eje motor con el eje conducido, unión de las piezas del motor, o la fijación de la bancada al suelo.

2.9 PARTES DE UNA EQUILIBRADORA

Las equilibradoras, constan de una serie de elementos comunes e indispensables para el funcionamiento correcto de este tipo de máquinas.

Las siguientes ilustraciones de este documento, sirven para la orientación y la localización de los elementos que componen en su conjunto una máquina equilibradora.

Figura 11. Conjunto máquina equilibradora 1.



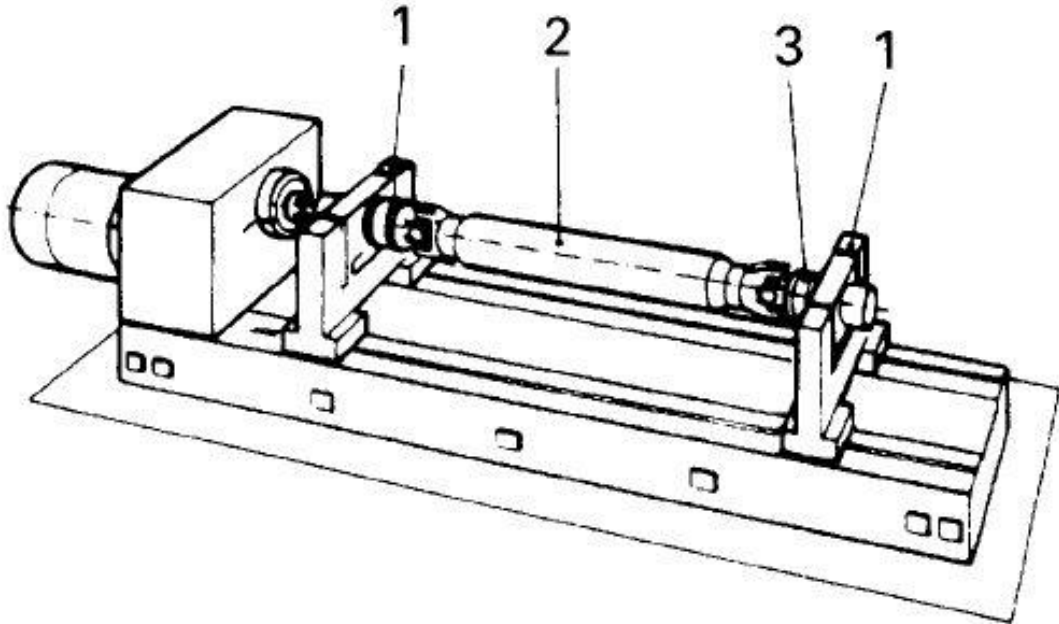
[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Motor de accionamiento:** Mecanismo que transforma en trabajo mecánico una forma de energía eléctrica en este caso.
- 2 **Clavijero:** Caja de cambios formada por una relación de engranajes donde se ajusta la velocidad de rotación transmitida.
- 3 **Transportador con escala de ángulos:** Escala de referencia de la posición angular donde se encontrará la equilibradora.
- 4 **Marca de ángulos:** Referencia que servirá de guía al transportador de ángulos.
- 5 **Placa frontal:** Placa perpendicular al eje principal de inercia donde se realizará la unión con la junta cardan.

- 6 **Eje de transmisión por junta cardan:** La velocidad de giro originada por el motor de accionamiento se transmitirá al rotor mediante una unión por junta cardan, cuyo eje sin desequilibrios residuales, deberá ser paralelo al eje principal de inercia.
- 7 **Árbol de transmisión cardan:** Permite unir dos ejes no colineales con el objetivo de transmitir la velocidad de rotación.
- 8 **Adaptador del eje:** Junta específica para poder realizar la unión de la junta cardan con el rotor mediante la sujeción a través de cuatro tornillos situados a intervalos de 90°.
- 9 **Sub-base:** Zona sobre la que se apoya o descansa el motor de accionamiento y el clavijero con todos sus mecanismos correspondientes.
- 10 **Zócalo:** Soporte o base maciza cuyo fin es evitar la transmisión de vibraciones provenientes del motor hacia el suelo.
- 11 **Bancada:** Base sobre la que se fijan unas guías o carriles que contienen los apoyos y se fija directamente al suelo de forma que estos queden nivelados.
- 12 **Apoyo:** Existirán dos (Plano 1 y Plano 2), sobre los que descansa el rotor o componente a realizar el equilibrado, perpendiculares al eje de rotación y macizos con el fin de absorber posibles vibraciones generadas.

Figura 12. Conjunto máquina equilibradora 2.

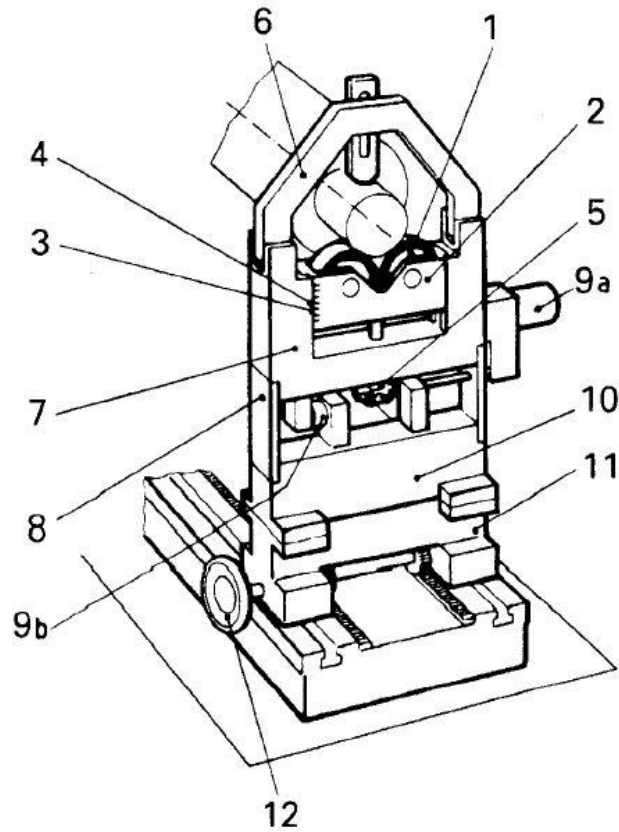


[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Apoyos:** Ver figura 11.
- 2 **Rotor:** Elemento principal que será sometido a el estudio del equilibrado para poder determinar si existen desequilibrios. Se conocerán todos los parámetros del rotor, por lo que será un patrón y así se podrá observar si los valores que muestra la máquina equilibradora son correctos o por el contrario está desajustada.
- 3 **Eje:** Línea horizontal entre apoyos donde el rotor girará en torno a este. Cuando se origina un desequilibrio, la distancia del eje con desequilibrio al eje de rotación principal se conoce como excentricidad.

Figura 13. Soporte principal de los apoyos.



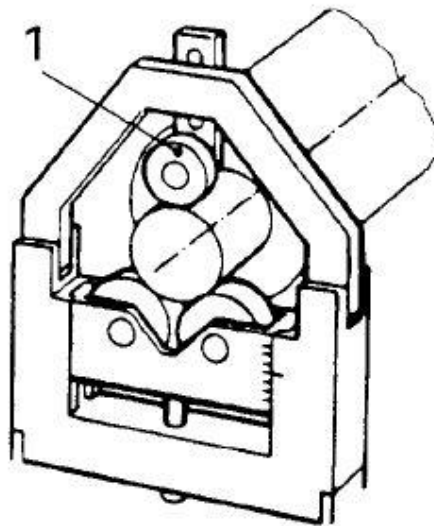
[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Rodillo abierto:** Rodillos sobre los que descansa el rotor o el componente a equilibrar, los cuales mediante una serie de sensores medirá la cantidad de desequilibrio existente.
- 2 **Carro de rodillos:** Soporte sobre los que se alojan los rodillos.
- 3 **Escala de medidas de altura:** Referencia de la posición a la que se sitúan los rodillos de altura respecto del suelo.
- 4 **Marca de medidas:** Escala que nos servirá de guía para comprobar a la altura que se está situando los rodillos con el fin de que estos se mantengan nivelados en el proceso.
- 5 **Ajuste de alturas:** Manivela vertical cuyo giro permite variar la altura a la que se quiera situar los rodillos.
- 6 **Soporte de seguridad:** Mecanismo de seguridad que impide que el rotor salte de su posición inicial por accidente o debido a un mal procedimiento del proceso.

- 7 **Puente del rodamiento:** Parte principal del apoyo sobre el que se sostiene el carro de rodillos.
- 8 **Muelles de suspensión:** Amortiguamientos para la absorción de vibraciones producidas por la rotación.
- 9a **Transductor:** Dispositivo capaz de transformar o convertir una determinada manifestación de energía de entrada, en otra de salida, situado este de forma horizontal.
- 9b **Transductor, posición alternativa:** Transductor situado de forma vertical.
- 10 **Apoyo:** Ver figura 11.
- 11 **Tubo de subida:** Soporte sobre el que descansan los apoyos y se fija sobre la bancada.
- 12 **Ajuste axial mediante engranaje móvil:** Manivela que transforma un movimiento de rotación en uno lineal para acercar o alejar la situación de los apoyos entre sí.

Figura 14. Puntos de sujeción del rotor con los rodillos en el soporte 1.

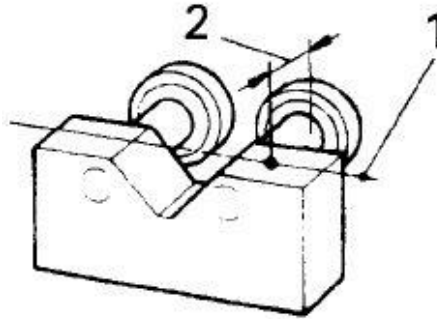


[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Rodillo de carga negativa:** Rodillo auxiliar situado en la parte superior donde apoya el rotor sobre el soporte de seguridad. No es un elemento imprescindible y no siempre puede existir.

Figura 15. Soporte contenedor de los rodillos.

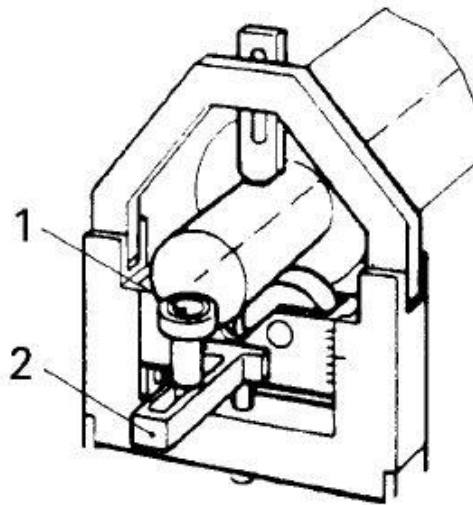


[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Línea central del apoyo:** Línea central del elemento apoyo.
- 2 **Distancia entre apoyo y rodillo:** Distancia entre los rodillos donde se situarán los sensores y el apoyo donde se sujetan los rodillos.

Figura 16. Puntos de sujeción del rotor con los rodillos en el soporte.

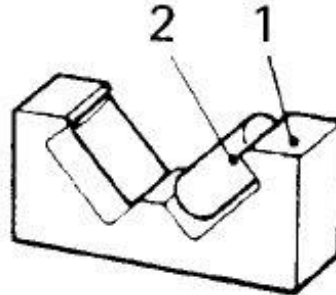


[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Rodillo transversal:** Elemento de seguridad que evita el movimiento de balanceo en dirección del eje de rotación del rotor.
- 2 **Soporte guía:** Elemento de fijación del rodillo transversal para ajustar el rotor a la distancia deseada mediante una especie de carril.

Figura 17. Soporte contenedor de los rodillos.

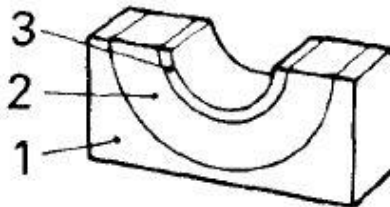


[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Apoyo para el rodillo en V:** Tipo de específico de soporte sobre los cuales se alojan los rodillos sobre los que girará el rotor en una disposición en forma de V.
- 2 **Rodillo inclinado:** Rodillo sobre los que monta el rotor dispuestos de manera inclinada y se transmite el movimiento de giro.

Figura 18. Tipo particular de soporte del rotor.

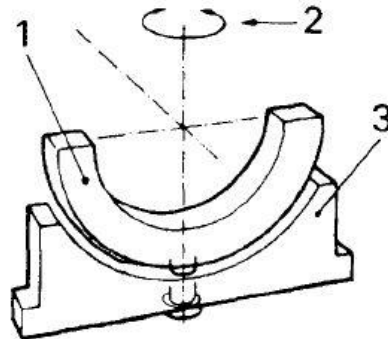


[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Soporte del carro:** Apoyo o elemento de sujeción del carro de bancada.
- 2 **Carro de bancada:** Elemento o pieza diseñada para evitar la propagación de vibraciones que inserta entre el soporte del carro y el medio casquillo del cojinete.
- 3 **Medio casquillo del cojinete:** Pieza o elemento sobre el que descansa el rotor y se genera la rotación.

Figura 19. Tipo particular de soporte del rotor 2.



[ISO 1925]

Elementos clave:

- 1 **Carro de bancada:** Ver figura 18.
- 2 **Grado de libertad:** Este tipo de soporte tiene como particularidad que permite un grado de libertad a mayores, ya que permite la rotación o giro del elemento carro de bancada sobre el que se fija el rotor.
- 3 **Soporte del carro:** Ver figura 18.

2.10 CLASIFICACIÓN DE LOS ROTORES

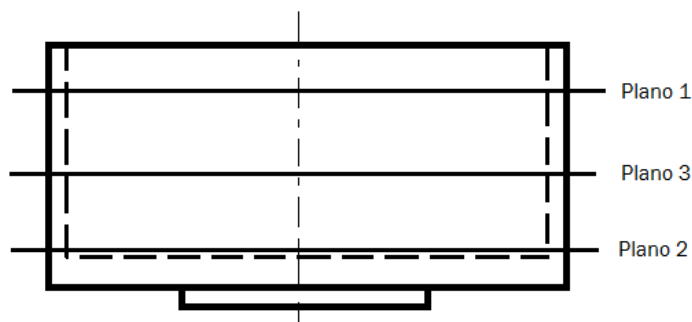
Se puede distinguir tres tipos de rotores:

Tipo A:

Aquellos cuyo rotor y equilibrado se realizan en una máquina vertical, con uno o dos planos de corrección dispuestos de forma horizontal.

Los planos de servicio de soporte pueden estar en cualquier lugar, uno a cada lado o situados a un lado del cuerpo principal del rotor.

Figura 20. Rotor tipo A según ISO 2953.

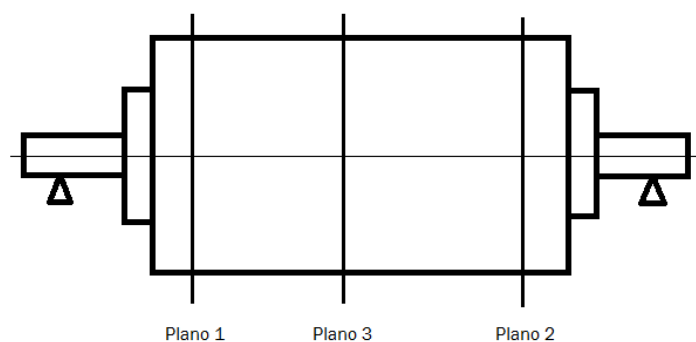


Tipo B:

Equilibrado en una máquina horizontal, normalmente con dos planos de corrección entre los cojinetes.

Por lo general, ambos planos se reparten de manera equidistante sobre los apoyos, a la misma distancia y perpendiculares al eje principal del rotor.

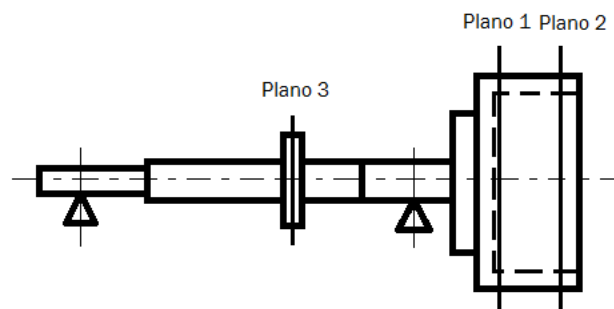
Figura 21. Rotor tipo B según ISO 2953.



Tipo C:

Equilibrado en una máquina horizontal, con dos planos de corrección que no necesariamente se sitúan entre los cojinetes.

Figura 22. Rotor tipo C según ISO 2953.



NOTA: Cualquier tipo de rotor, de los tres especificados anteriormente, se colocan sobre los apoyos. También, se puede combinar los dos planos de corrección en un único plano de corrección al que denominaremos plano 3 y se compone de la suma de los desequilibrios del plano 1 y el plano 2 para cada caso.

2.11 VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Se debe distinguir los procesos entre alta-baja velocidad de rotación:

La velocidad más baja (de 60 a 600 rpm), debe ser utilizada para el equilibrado o pre-equilibrado de rotores de gran diámetro y peso correspondiente a la capacidad máxima de la máquina equilibradora, o con fuertes desequilibrios iniciales.

La velocidad más alta (mayor de 600 rpm) debe ser normalmente utilizada para rotores correspondientes a la capacidad mínima de la máquina, o para grandes rotores ya suficientemente equilibrados en velocidad baja y para conseguir tolerancias de equilibrado bajas.

Cuando el desequilibrio inicial del rotor no sea conocido, se aconseja efectuar una ejecución de equilibrado siempre a velocidad baja, y utilizar la velocidad más alta solo para ejecutar rotores ya suficientemente equilibrados, accionando la máquina con la debida cautela.

En las equilibradoras dotadas de accionamiento a velocidad variable, el rotor puede pasar por una o más frecuencias de resonancia, por esta causa, si las indicaciones de desequilibrio resultan inestables, se aconsejan aumentar o disminuir convenientemente la velocidad de rotación.

NOTA: La velocidad de rotación (ω) influye en el cálculo del valor de la excentricidad (e) de tal manera que para un mismo grado de calidad, si la velocidad de rotación aumenta, la excentricidad disminuye y si la velocidad de rotación disminuye, la excentricidad aumenta. Una vez conocida la excentricidad se determinará el desequilibrio residual admisible o tolerancia de equilibrado (p.r.) como se verá en el *apartado 2.12*.

2.12 PARÁMETROS DEL EQUILBRADO

El equilibrado tiene la finalidad de mejorar la distribución de las masas de un cuerpo rotativo de tal manera que éste gire sobre sus apoyos sin crear fuerzas centrífugas superiores a un valor límite admisible.

Inevitablemente después de un equilibrado permanecen desequilibrios residuales por muy pequeños que sean..

Todos los equipos descritos en este documento son de **comprobación directa** de la medida, por tanto, las consideraciones generales a tener en cuenta para su uso son:

Comprobar que el rango de medida del equipo es suficiente para la medida a tomar.

Comprobar que la incertidumbre del equipo es la adecuada para la tolerancia de la medida.

Las siguientes indicaciones son válidas para los rotores rígidos y no flexibles.

A continuación, se va a describir en una tabla los parámetros con los que se trabajará para medir los desequilibrios de una máquina.

Tabla 2. Parámetros de trabajo esenciales en el equilibrado.

Nombre	Símbolo	Unidad
Masa de desequilibrio.	p	g
Radio del rotor.	r	mm
Masa del rotor.	P	kg
Velocidad del rotor.	ω	rpm
Desequilibrio residual admisible.	p.r	g·mm
Excentricidad.	e	μ m
Grado de equilibrado.	G	mm/s

Se establecerá un “**desequilibrio residual admisible**” o “**tolerancia de equilibrado**” cuyo valor variará en cada caso según las exigencias de cada una de las piezas, así que en el equilibrado es necesario obtener la precisión de equilibrado apta para cada caso.

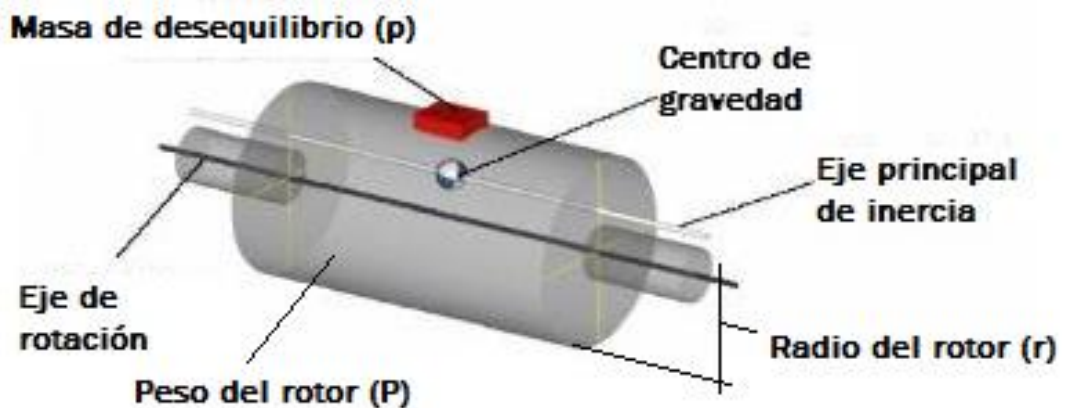
El “**desequilibrio residual admisible**” se obtiene del producto del “**masa de desequilibrio**” por el “**radio del rotor**” o también como el producto de la “**excentricidad**” por el “**peso del rotor**” como se muestra en la siguiente ecuación:

$$p \cdot r = p \cdot r = e \cdot P \quad (\text{EC.4})$$

Si se divide la “**tolerancia de equilibrado**” entre el “**peso del rotor**” se obtiene la “**excentricidad**”.

$$e = p \cdot r / P \quad (\text{EC.5})$$

Figura 23. Parámetros del equilibrado.





ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

3 DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN

Será el apartado más relevante del documento donde se recoge la información precisa para poder realizar una correcta comprobación de que nuestra máquina equilibradora está obteniendo valores del desequilibrio dentro de unos márgenes establecidos como válidos.

- Lo primero que se tratará es de describir las máquinas equilibradoras con las que se ha trabajado y sus parámetros fundamentales.
- Posteriormente se realizará el estudio de exactitud y precisión de nuestra máquina recogida en la norma ISO 2953:1999:
 - **1ª Test:** Desequilibrio residual alcanzable mínimo (**test U_{MAR}**) para determinar la **exactitud**.
 - **2º Test:** Prueba de la reducción del desequilibrio (**test U_{RR}**) para determinar la **precisión**.

Normativa de referencia:

- Norma ISO 2953:1999. *Mechanical vibration – Balancing machines – Description and evaluation*. “Vibraciones mecánicas – Máquinas equilibradoras – Descripción y evaluación”.
- Norma ISO 1925:2001. *Mechanical vibration – Balancing – Vocabulary*. “Vibraciones mecánicas – Equilibrado – Vocabulario”.
- Norma ISO 1940-1: 2003. *Mechanical Vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state*. “Vibraciones mecánicas – Requerimientos de calidad de equilibrado para rotores (rígidos) constante”.

3.1 TIPOS DE EQUILIBRADORAS DE TRABAJO

- EQUILIBRADORA KAISER RM 3000.2

Figura 24. Equilibradora KAISER RM 3000.2



Datos técnicos:

- Velocidad de equilibrado (MIN-MAX): 60 – 1470 rpm.
- Desequilibrio residual alcanzable: 6 g·mm.
- Peso máximo de rotor: 4500 kg.

Tabla 3. Características equilibradora Kaiser RM 3000.2

Características	Velocidad de rotación	Resolución “sensibilidad máxima”
<p>En esta equilibradora de la serie RM, los medidores de fuerza son de soporte rígido. Dispone de captadores de tipo piezo-eléctrico, en los cuales la señal es directamente proporcional a la fuerza centrífuga producida por el desequilibrio, independientemente del peso del rotor.</p> <p>Determinando los planos de corrección y su posición respecto a los soportes, la distancia entre planos y los radios de compensación, se obtiene una indicación directa sin lanzamientos de prueba ni cálculos.</p>	<p>Velocidad baja: (60-600)</p> <p>Velocidad alta: (600-1500)</p>	<p>6 g·mm</p>

[KAISER]

- EQUILIBRADORA SCHENCK KHGW 20-B

Figura 25. Equilibradora SCHENCK KHGW 20-B



Datos técnicos:

- Velocidad de giro husillo MAX: 6000 rpm.
- Desequilibrio residual alcanzable: 25 g·mm.

Tabla 4. Características equilibradora Schenck KHGW 20-B

Características	Velocidad de rotación	Resolución "sensibilidad máxima"
<p>Esta equilibradora del tipo HGW 20-B es de uso específico para el correcto equilibrado de las juntas cardan, responsables de la transmisión del giro entre dos puntos no concordantes.</p> <p>El empleo de equilibradoras de soporte rígido permite el equilibrado de rotores de una gran variedad de pesos y en una amplia gama de velocidades.</p> <p>La instrumentación estándar empleada es de tipo computerizado.</p>	<p>Velocidad baja: (60-600)</p> <p>Velocidad alta: (600-1500)</p>	<p>25 gmm</p>

[SCHENCK]

- EQUILIBRADORA HOFMANN HL-25

Figura 26. Equilibradora HOFMANN HL-25



Datos técnicos:

- Velocidad de equilibrado (MIN-MAX): 60 – 1500 rpm
- Desequilibrio residual alcanzable: 20 g·mm

Tabla 5. Características equilibradora Hofmann HL-25

Características	Velocidad de rotación	Resolución “sensibilidad máxima”
<p>Esta es una máquina para la medición de desequilibrio en dos planos. La máquina realiza la medición de los desequilibrios sin permitir momentos residuales. La indicación se efectúa sin necesidad de ajuste previo mediante un rotor de prueba. El control de funcionamiento puede realizarse con un rotor patrón que posea desequilibrios conocidos.</p> <p>Las posiciones de desequilibrio se transmiten, a través de una célula fotoeléctrica de distancia situado en el interior del cabezal y en combinación de una marca óptica o mecánica.</p>	<p>Velocidad baja: (60-600)</p> <p>Velocidad alta: (600-1500)</p>	<p>20 gmm</p>

[HOFMANN]

3.1.1 EQUILIBRADORA UTILIZADA EN EL PROCESO

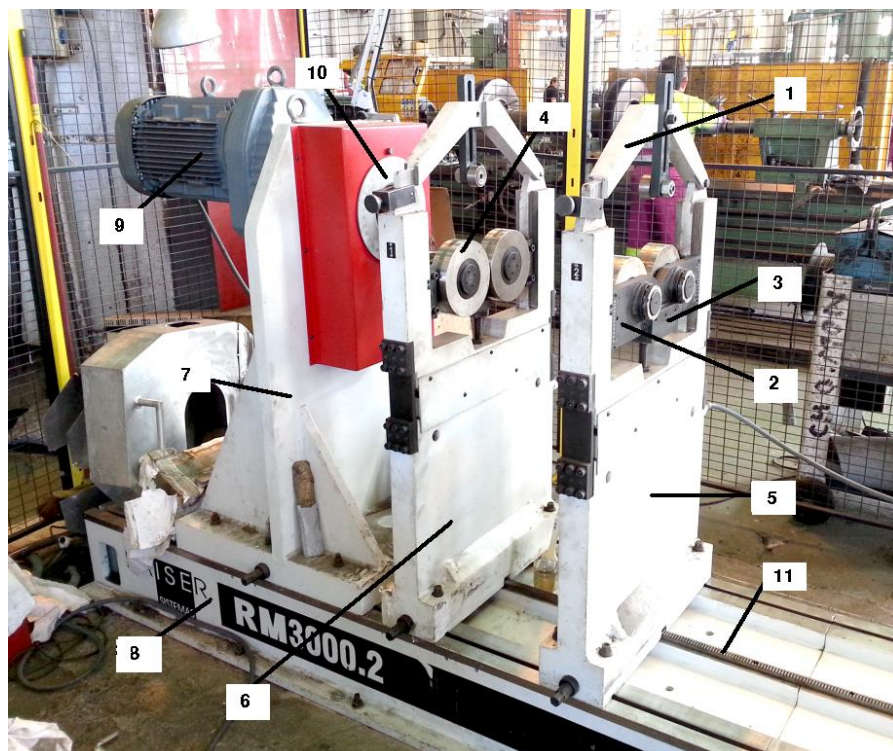
Esta máquina equilibradora será la **KAISER RM3000.2** (Ver apartado 3.1).

La siguiente ilustración de este documento, sirve para la orientación y la localización de los elementos de la máquina con la que se ha realizado el proceso de ajuste y posterior proceso de calibración.

Los elementos más característicos de la máquina son:

- (1) Contrasoportes con rodillo.
- (2) Alojamiento de rodillos.
- (3) Contrasoporte axial.
- (4) Alojamiento de rodillos (sensores) con contrasoporte axial.
- (5) Pedestal de soporte. Plano 2.
- (6) Pedestal de soporte. Plano 1.
- (7) Pedestal de soporte motor
- (8) Bancada de la máquina equilibradora.
- (9) Motor generador.
- (10) Zona de conexión del rotor con el motor.
- (11) Carril guía pedestales.

Figura 27. Equilibradora KAISER RM300.2 utilizada para el estudio del ajuste.



3.2 FACTORES A TENER EN CUENTA EN EL PROCESO

3.2.1 CONSERVACIÓN DE LAS MÁQUINAS EQUILIBRADORAS

Para poder trabajar con la máquina equilibradora y alargar su vida útil se deberá:

- Mantener la máquina, el sistema y la zona de trabajo limpio y ordenado.
- Mantener todos los pedales, descansillos, barandillas, plataformas, asideros, escalones, etc. limpios.
- Antes de limpiar la máquina con agua u otros materiales de limpieza, cubrir/cerrar todas las aberturas, en las que no debe entrar agua/detergente por razones de seguridad y funcionamiento. Esto sería especialmente peligroso para los motores eléctricos y armarios de distribución.
- Aceite escurrido o polvo de amoladura muy fino forman una superficie lisa y peligrosa cuando se depositan sobre el suelo. Las virutas que se forman durante el mecanizado pueden provocar a los operarios heridas de cortadura. Las piezas a trabajar, piezas de la máquina o depósitos que no están en su sitio también pueden constituir un peligro.
- No usar detergentes agresivos y usar trapos sin fibras.
- En caso de un uso inadecuado, manejo incorrecto o mantenimiento insuficiente, la máquina puede causar un riesgo para el personal u operario de manejo habitual de la máquina.

NOTA: Es responsabilidad del operario mantener la máquina y sus componentes en correcto estado debiendo realizar temporalmente trabajos de limpieza de la equilibradora y ordenar sus componentes con la finalidad de alargar su vida útil y el manejo adecuado, cumpliendo las normas que recogerá el documento de plan de mantenimiento preventivo para cada tipo de equilibradora.

3.2.2 CUALIFICACIÓN DEL PERSONAL

El encargado debe administrar todos los trabajos con la máquina (por ejemplo; manejo, mantenimiento y vigilancia) únicamente a personas cualificadas. Las personas no cualificadas no deben realizar ningún trabajo con las máquinas o en su cercanía.

3.2.3 CONDICIONES AMBIENTALES

La toma de datos para realizar el estudio de ajuste de equilibrado de la máquina mediante el test U_{MAR} y el test U_{RR} según ISO 2953 y el procedimiento de calibración se realizan in-situ, en el lugar donde se situará la máquina para su uso habitual con las siguientes condiciones ambientales.

- Temperatura ambiente en el taller entre $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Humedad relativa en el taller entre 20% - 80% HR.

Estas condiciones ambientales deberán mantenerse durante todo el transcurso de la calibración y estar controladas por equipos convenientemente calibrados.

Los intervalos de condiciones ambientales son tan amplios debido a que la máquina con la que se ha estado trabajando es de grandes dimensiones y se realizará el estudio en el propio taller donde está ubicada y no en un departamento o laboratorio con condiciones ambientales más controladas.

Todos aquellos procedimientos y estudios de calibración que se puedan realizar en el laboratorio de metrología en vez de en el taller, se trasladarán al laboratorio, debido a que así se podrán garantizar unas condiciones ambientales de trabajo óptimas y controladas. Estas condiciones más controladas de laboratorio serán:

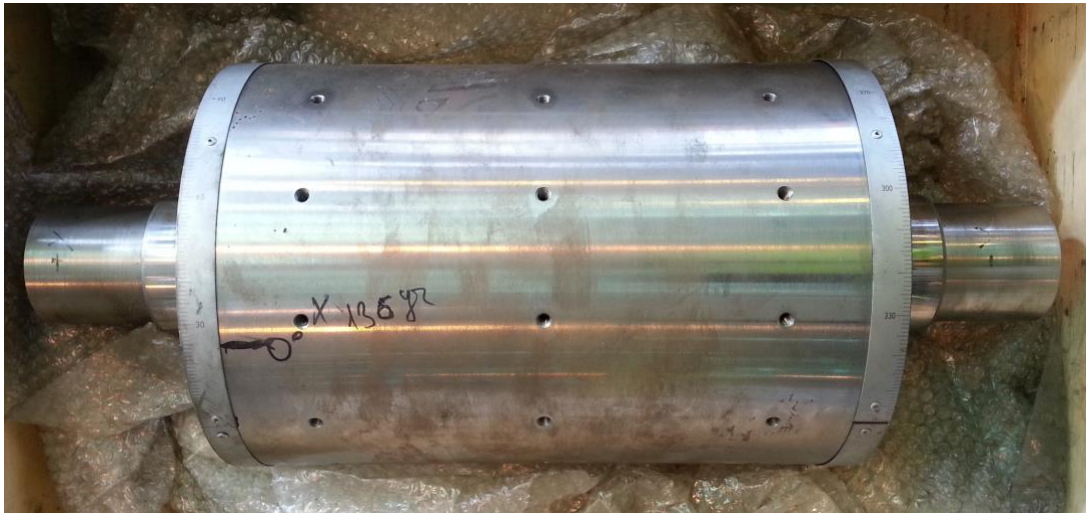
- Temperatura ambiente en el laboratorio entre $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Humedad relativa en el laboratorio entre 40% - 60% HR.

3.3 PATRONES NECESARIOS

Para la calibración de los equipos de equilibrado podrán usarse como patrones los siguientes equipos de medición:

- Rotor patrón tipo B según ISO 2953:1999, provisto de agujeros para insertar las masas patrones en ello y generar desequilibrios conocidos.

Figura 28. Rotor patrón.



- Masas de pruebas patrón, construidas según ISO 2953:1999:

Figura 29. Juego de masas patrones.



Tabla 6. Masas patrones con las que se creará un desequilibrio conocido.

<p>- 1ª MASA REF: 65g.</p>	
<p>- 2ª MASA REF: 136 g.</p>	
<p>- 3ª MASA REF: 680 g.</p>	

- Cualquier otro equipo de medición capaz de proporcionar la incertidumbre adecuada del equipo a utilizar. Ejemplo: Medidoras de coordenadas, básculas de precisión, reloj comparador.
- Tornillos de nivelación en la bancada para conferir a las máquinas una mayor estabilidad, especialmente en el equilibrado de rotores de gran diámetro.

3.3.1 CONDICIONES DE ESTADO DEL ROTOR PATRÓN

Para poder realizar el estudio de ajuste de la máquina equilibradora, previamente se debe garantizar la situación y estado óptimo del rotor patrón a partir de inspecciones previas a la puesta en marcha y la realización de ejecuciones con este. Se puede realizar diferentes procesos para confirmar el correcto estado de mantenimiento del rotor:

La primera observación más básica y no por ello menos importante es la **inspección visual** que deberá realizarse siempre que se vaya a utilizar el rotor.

El segundo método que hay que destacar es la realización de **ensayos no destructivos (END)** sobre el rotor patrón:

- Partículas magnéticas: Permite detectar fallos superficiales y subsuperficiales mediante campos magnéticos.
- Inspección de ultrasonidos: Utilizar una onda sonora y observar su distribución a través del rotor mediante un detector de fallas.
- Líquidos penetrantes: Permite detectar discontinuidades sobre la superficie del material examinado, el rotor en este caso.

Por último se puede realizar un equilibrado estático previo y dispersión de las masas del rotor.

Figura 30. Rotor patrón a tener en perfecto estado de conservación.



3.4 COMPROBACIÓN DE LOS DESEQUILIBRIOS

3.4.1 CATEGORÍAS Y DIAGRAMA DEL GRADO DE CALIDAD

En la tabla 7 que se muestra a continuación, se han resumido ejemplos de clases de elementos rotativos y se han concentrado en grupos y ordenado en determinados grados de calidad (G).

El grado de calidad (G) del elemento rotativo junto con la velocidad de giro (ω) dará el valor de la excentricidad (e).

Cuanto menor sea el grado de calidad del elemento a estudiar, mayor será su calidad, por lo que la excentricidad obtenida será menor y la exactitud mayor.

Todas las clases de máquinas y elementos rotativos no tienen por qué depender de un único grado de calidad. Así por ejemplo, no existe ningún grado de calidad específico del eje articulado, estas más bien al aplicarse en diversos empleos pueden acoplarse también a diversos grados de calidad.

Tabla 7. Elementos rotativos o máquinas en función de los niveles del grado de calidad de equilibrado.

Grado de calidad	$e\omega^*$ [mm/s]	Elementos rotativos o máquinas
(ninguno)	(>1600)	Transmisiones con cigüeñal** de motores diésel lentos de barcos fijados rígidamente.
G1600	1600	Transmisiones con cigüeñal de grandes motores de dos tiempos fijados rígidamente.
G630	630	Transmisiones con cigüeñal de motores de cuatro tiempos fijados rígidamente y de motores diésel de barcos fijados elásticamente.
G250	250	Transmisiones con cigüeñal de motores diésel de cuatro cilindros rápidos fijados rígidamente.
G100	100	Transmisiones con cigüeñal de motores diésel rápidos fijados rígidamente con 6 o más cilindros. Motores de automóviles, camiones y locomotoras completos.

Tabla 7 (continuación). Elementos rotativos o máquinas en función de los niveles del grado de calidad de equilibrado.

Grado de calidad	$e\omega^*$ [mm/s]	Elementos rotativos o máquinas
G40	40	Ruedas de automóvil, llantas, ejes ferroviarios montados, ejes articulados. Transmisiones con cigüeñal de motores de cuatro tiempos rápidos fijados rígidamente con 6 o más cilindros. Transmisiones con cigüeñal de motores de automóviles, camiones y locomotoras.
G16	16	Ejes articulados con exigencias particulares. Piezas de máquinas desmenuzadoras y agrícolas. Piezas de transmisión con cigüeñal de motores de automóviles, camiones y locomotoras. Transmisiones con cigüeñal de motores de 6 o más cilindros con exigencias particulares.
G6.3	6.3	Piezas en ingeniería de procesos de tambores de centrifugadoras. Ventiladores, volantes, bombas centrifugas. Piezas de máquinas normales y herramientas. Rotores de motores eléctricos normales. Piezas de transmisión con cigüeñal con exigencias particulares.
G2.5	2.5	Rotores de turbinas de gas y vapor motores de reacción turbogeneradores. Accionamientos de máquinas herramientas. Rotores de motores eléctricos medios / grandes por exigencias particulares y rotores de motores eléctricos pequeños con accionamiento por turbina.
G1 "Equilibrado de alta calidad"	1	Arrastre de cinta magnética y de equipo fonográfico. Accionamientos de rectificadoras. Motores pequeños con exigencias especiales.
G0.4 "Equilibrado de muy alta calidad"	0.4	Inducidos, árboles, discos de rectificadoras de precisión, giroscopios y rotores.

[ISO 1940]

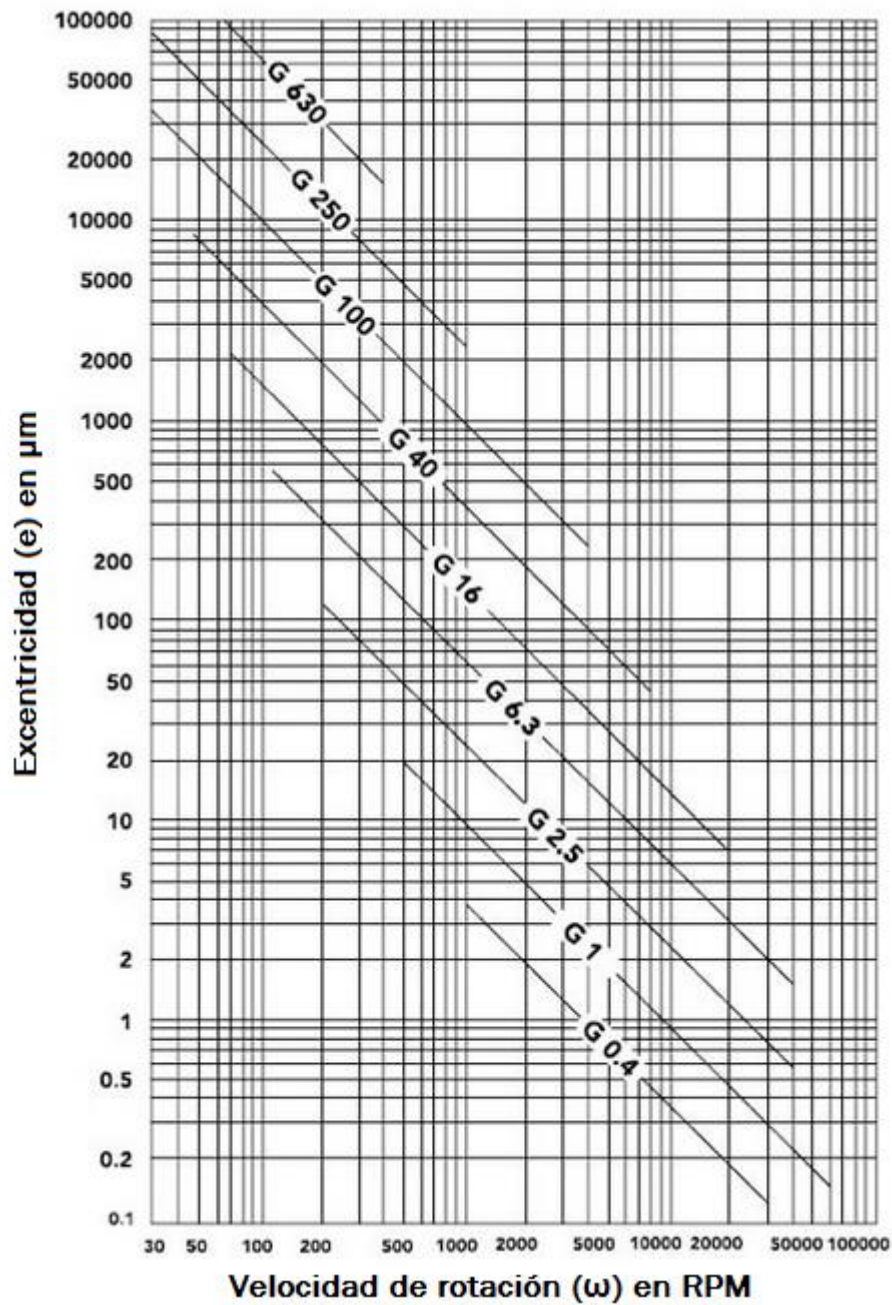
*) $\omega = n \cdot 2\pi / 60 = n / 10$ con ω en [1/s] y n en [rpm], donde $\omega =$ *velocidad de rotación*.

**) Se denomina transmisión con cigüeñal al conjunto: cigüeñal, volante, embrague, polea, amortiguador, componente rotante de la biela, etc.

A continuación se muestra en la figura 31 el diagrama con los grados de calidad de equilibrado para rotores rígidos.

Conociendo el grado de calidad (G) para un determinado elemento rotativo obtenido de la tabla 7 y la velocidad de rotación (ω), se puede determinar el valor de la excentricidad (e).

Figura 31. Diagrama del grado de calidad.



[ISO 1940]

El grado de calidad del equilibrado G se determinará según las características del rotor y de la máquina en la cual funcionará el rotor en servicio normal.

A partir de la *tabla 7* con los elementos rotativos o máquinas para el estudio del equilibrado, se obtiene el grado de calidad (G). Una vez obtenido el grado de calidad específico para cada caso y teniendo en cuenta la velocidad de giro del rotor (ω), se entra en el diagrama descrito en la *figura 31* del grado de calidad para obtener la excentricidad (e). [ISO 1940].

Por último, se determinará la tolerancia de equilibrado (p.r.) como el producto de la excentricidad residual (e) por el peso del rotor (P), cuyo valor es el necesario para obtener la precisión de equilibrado correcto de la máquina (Ver *ecuación 4*). [ISO 1940].

3.4.2 PROCEDIMIENTO DE COMPROBACIÓN DE LOS DESEQUILIBRIOS

Para el ajuste de nuestra máquina equilibradora se deberá realizar una comprobación atendiendo a la información y datos técnicos recogidos en la norma:

- Norma ISO 2953:1999. *Mechanical vibration – Balancing machines – Description and evaluation*. “Vibraciones mecánicas – Máquinas equilibradoras – Descripción y evaluación”.

Para ello se deberá completar la hoja de cálculo adjunta “COMPROBACIÓN SEGÚN ISO 2953” para la comprobación del desequilibrio de la máquina equilibradora completando el test U_{MAR} de exactitud y el test U_{RR} de precisión y siguiendo una serie de pautas expuestas en los apartados:

- **Comprobación de la exactitud. Test U_{MAR} . “Apartado 3.4.3.”**

Donde; U_{MAR} significa: “Minimum Achievable Residual Unbalance”.

“Mínimo Desequilibrio Residual Alcanzable”.

- **Comprobación de la precisión. Test U_{RR} . “Apartado 3.4.4.”**

Donde; U_{RR} significa: “Unbalance Reduction Ratio”.

“Relación de Reducción del Desequilibrio”.

Además se tendrá que tener en cuenta que:

- Se realizará una limpieza y una inspección visual del equipo de medida a fin de comprobar el buen estado del equipo, que no existen deformaciones en las zonas activas de la comprobación, el funcionamiento de los dispositivos de bloqueo, el deslizamiento suave de las partes móviles y su identificación.
- Se comprobará la correcta legibilidad de las escalas de medición en las pantallas indicadoras.
- Deberán mantenerse en buen estado los soportes donde se transfiere la fuerza a los sensores así como los patrones, desengrasando los mismos con papel y paños suaves y con algún disolvente adecuado, como por ejemplo una mezcla de alcohol y éter al 50%.
- Se ejecutará (lanzará) la máquina equilibradora llevando el resultado mostrado en pantalla a su máximo valor posible y disminuyendo progresivamente el valor hasta la indicación de cero, al menos tres veces y se ajustará el cero para los equipos que lo requieran.
- Se efectuará el ajuste entre el rotor y la equilibradora haciendo coincidir la marca lectora del rotor con la fotocélula de la equilibradora para partir de un ángulo de referencia conocido.
- Se realizarán al menos de 3 a 5 calibraciones de verificación con rotores patrones de forma uniforme. La calibración se realizará en un rango de valores que comprenda el valor del campo de medida del equipo.
- En cada informe de calibración se anotarán los valores de las condiciones ambientales (temperatura y humedad) por si fuera necesario realizar alguna corrección.

Plantilla de la hoja de cálculo “COMPROBACIÓN SEGÚN ISO 2953”:

Tabla 8. Plantilla COMPROBACIÓN SEGÚN ISO 2953

INFORME DE CALIBRACIÓN SEGÚN ISO 2953	
Laboratorio de Metrología de Valladolid	
Procedimiento:	VER HOJAS ADJUNTAS
La calibración se ha realizado utilizando el procedimiento indicado en hoja adjunta atendiendo a los procedimientos expuestos en la norma ISO 2953, estableciendo la relación existente entre las lecturas del equipo y de las medidas del patrón utilizado, tras permanecer el tiempo suficiente para permitir la estabilización.	
Cálculo de incertidumbres:	VER HOJAS ADJUNTAS
El desequilibrio de la máquina y los resultados de la calibración se expresan en la hoja adjunta, se ha calculado a partir del procedimiento de calibración, de las magnitudes de influencia y de las contribuciones del equipo de equilibrado	
Trazabilidad:	
VER HOJAS ADJUNTAS	
Condiciones ambientales durante la calibración:	VER HOJAS ADJUNTAS
Temperatura:	H.R : .
:Resultados de la Calibración	
VER HOJAS ADJUNTAS	
Incertidumbre expandida: VER HOJAS ADJUNTAS	
Observaciones:	VER HOJAS ADJUNTAS
Realizado por:	Fecha de toma de medidas:
GERMÁN DIEZ GARCÍA	19/09/2015
Cargo: COLABORADOR DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE VALLADOLID	

INFORME DE CALIBRACIÓN SEGÚN ISO 2953

Laboratorio de Metrología de Valladolid

Equipo /Instrumento Nº : ----
Instrument Number

Denominación : **EQUILIBRADORA HORIZONTAL**
Instrument

Marca : **KAISER**
Manufacturer

Modelo: **RM 3000.2**
Model

Número de Serie: ---
Serial number

Solicitante : **Universidad de Valladolid (UVa)**
Customer

Fecha/s de Calibración: **19/09/2015**
Date/s of calibration

Signatarios/s autorizado/s:
Authorized signatory/ies

Fecha de emisión:
Date of issue

19/09/2015

Responsable del Laboratorio de Metrología de Valladolid

Comprobación de la exactitud: Test U_{MAR}.

Fecha del test:.....
 Empresa:.....
 Solicitante del test:.....
 Operador de la máquina:.....
 Test realizado por:.....

Marca de la máquina:.....
 Modelo:..... nº:.....

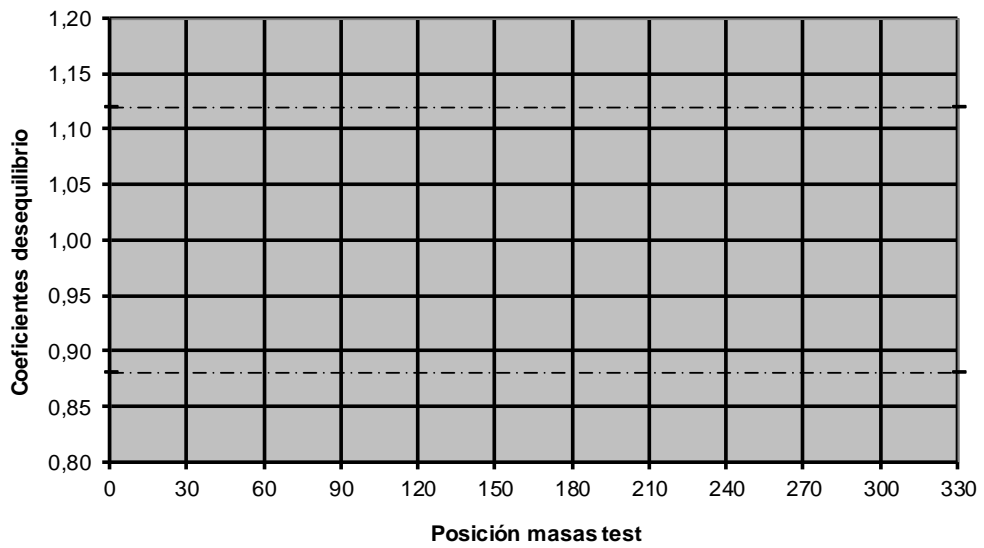
Tipo de rotor patrón:..... Número (según norma):.....
 Masa patrón test:.....g Masa rotor:.....kg
 Velocidad del test:.....r/min Radio rotor:.....mm
 Excentricidad:.....µm
 1ºUmar (desequilibrio residual admisible) = Masa del rotor x Excentricidad =g·mm
 2º Umar (masa de desequilibrio) = 1ºUmar / Radio rotor =g

Plano de lectura	Plano 1		Plano 2		Corrección
	Cantidad [g]	Angulo [°]	Cantidad [g]	Angulo [°]	
Lanzamiento 1 desequilibrio inicial					No. 1
Lanzamiento 2					No. 2
Lanzamiento 3					No. 3
Lanzamiento 4					No. 4
Lanzamiento 5 desequilibrio final					No permitida
Lanzamiento 6					No permitida

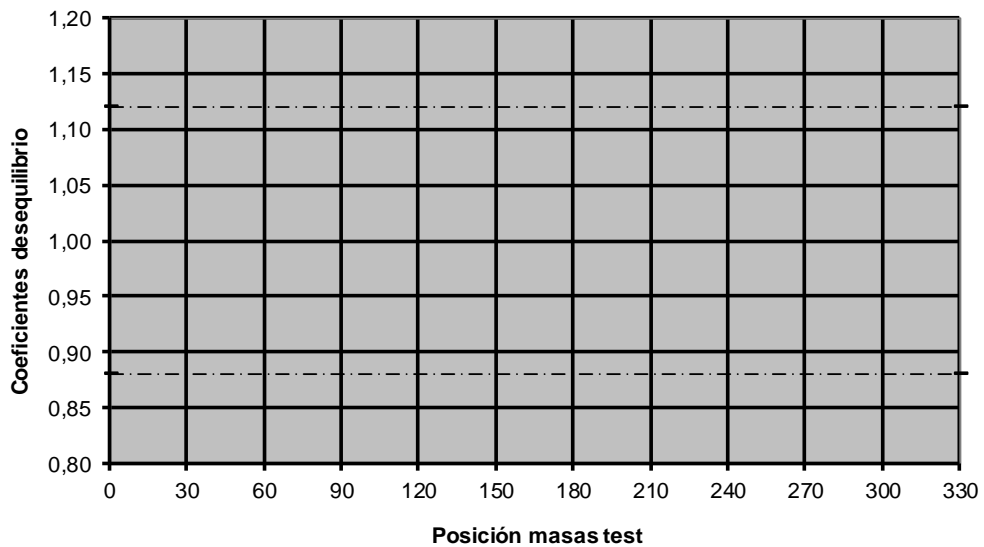
Posición de las [°]	Cantidad desequilibrio	Cantidad desequilibrio	Coeficiente	Coeficiente
	Plano 1	Plano 2	Plano 1	Plano 2
0°				
30°				
60°				
90°				
120°				
150°				
180°				
210°				
240°				
270°				
300°				
330°				
Suma:	0	0		
Valor medio:	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!		

Resultados gráficos test U_{MAR} .

Plano 1



Plano 2



Comprobación de la precisión: Test U_{RR} .

Empresa:.....	
Solicitante del test:.....	
Marca de la máquina:.....	Modelo:.....
Operador de la máquina:.....	
Test realizado por:.....	Fecha del test:.....

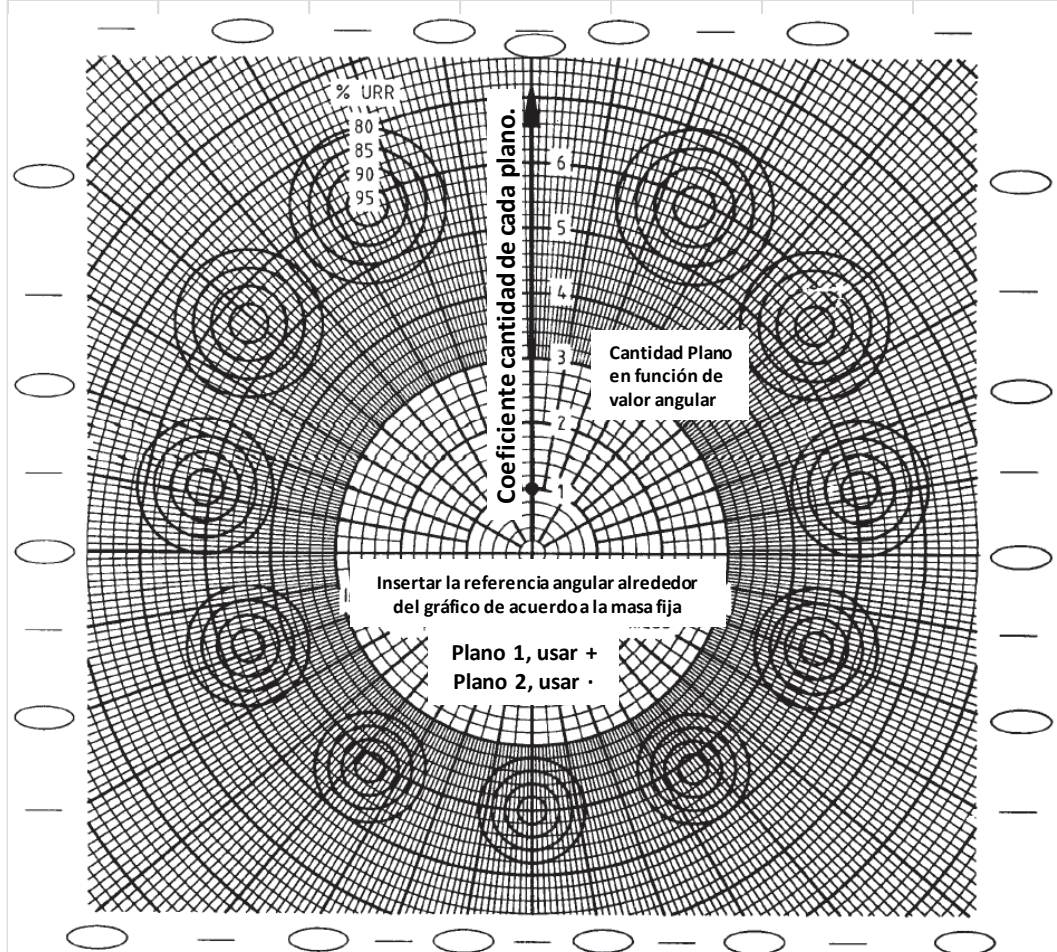
Tipo de rotor patrón:.....	Número (según norma):.....
Excentricidad:..... $\mu\text{m} = \text{g}\cdot\text{mm}/\text{kg}$	Masa rotor:..... kg
Desequilibrio residual admisible $1^{\circ}U_{mar} =$ g	

$U_{fijo} =$	$xU_{mar} =$	g·mm
Radio:..... mm	Masa fija:.....	g
$U_{movil} = 5xU_{fijo} =$		g·mm
Radio:..... mm	Masa móvil:.....	g

L a n z a m i e n t o s	Test posición de masas (ángulo)				Lectura desequilibrio		Cantidad Plano 1 (**)	Lectura desequilibrio		Cantidad Plano2 (**)
	Plano 1		Plano 2		Plano 1			Plano 2		
	Fijo	Movil	Fijo	Movil	Cantidad [g]	Angulo [°]		Cantidad [g]	Angulo [°]	
1	0°	30°	0°	30°						
2	0°	60°	0°	60°						
3	0°	90°	0°	90°						
4	0°	120°	0°	120°						
5	0°	150°	0°	150°						
6	0°	180°	0°	180°						
7	0°	210°	0°	210°						
8	0°	240°	0°	240°						
9	0°	270°	0°	270°						
10	0°	300°	0°	300°						
11	0°	330°	0°	330°						

(**) Lectura del plano dividido entre Contrapeso Fijo en g.

Resultados gráficos test U_{RR}.



Resultados URR:

Plano 1:	%
Plano 2:	%

Gráficos test URR realizado por:

Document according for ISO 2953 / Documento según ISO 2953

3.4.3 COMPROBACIÓN DE LA EXACTITUD. TEST U_{MAR} .

El objetivo principal de este test es poder verificar que los datos obtenidos (*Valor medido*) no se alejan del valor más teórico (*Valor ideal*). Por lo tanto, este test está asociado a error, a parámetros de localización para que sea posible observar la **exactitud** de nuestra máquina equilibradora.

Lo primero que se deberá rellenar son los datos informativos sobre la máquina, fecha de realización del test, operario que ha realizado el procedimiento, etc., que se anotarán en la *tabla 10*.

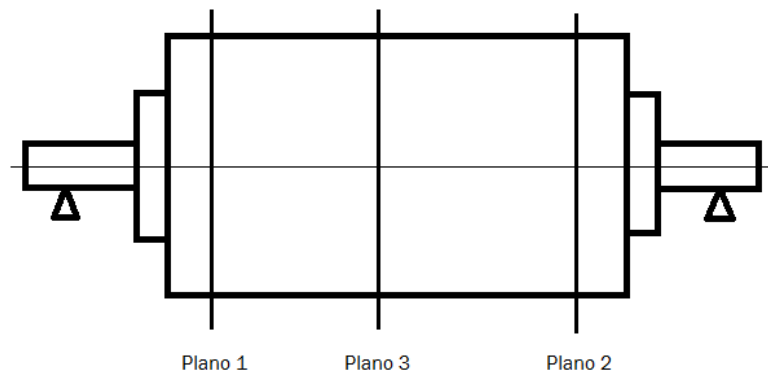
A continuación se registrará los datos técnicos del rotor patrón, las masas patrón y los parámetros con los que se ha realizado este test:

- **Tipo de rotor:**

Para este estudio, el rotor patrón utilizado según Norma ISO 2953 será:

Tipo B. (*Ver apartado 2.5*).

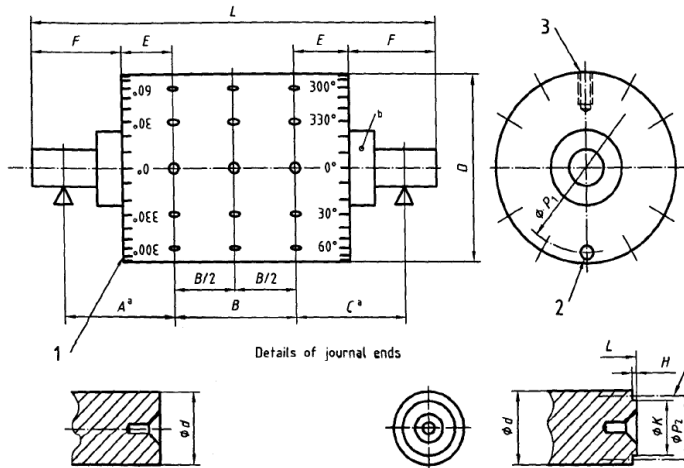
Figura 32. Rotor utilizado tipo B para el test Umar.



- **Número (según norma):**

Este parámetro dará la información geométrica y técnica del rotor patrón con el que se va a realizar la prueba. Esta información, se recoge en la Norma ISO 2953 en función del tipo de rotor (Tipo B en nuestro caso): $N^{\circ} = 6$.

Figura 33. Datos geométricos del rotor tipo B.



Características del rotor patrón:

1. Rotor simétrico respecto al plano central y el eje principal de giro.
2. Consta de 36 agujeros repartidos uniformemente en tres planos (12 agujeros por plano).
3. En cada plano, los agujeros se encuentran desfasados a intervalos de 30° .

Tabla 9. Parámetros geométricos y técnicos del tipo de rotor.

Rotor No.	Rotor Masa M	Diam. mayor	Long total $L=2,5D$	Diam. Eje $d=0,3D$	Distancia entre apoyos $A+B+C=2D$	$A=0,5D$	$B=D$	$E=0,25D$	$F=0,5D$	P1	H	K	P2	N	Velocidad crítica	Velocidad máxima para el test
Valores métricos																
	kg	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	r/min	r/min
1	0,5	38	95	11	76	19	38	9,5	19	31	-	-	-	M2	200000	20000
2	1,6	56	140	17	112	26	56	14	28	46	-	-	-	M3	140000	14000
3	5	82	205	25	164	41	82	20,5	41	72	-	-	-	M4	95000	9500
4	16	120	300	36	240	60	120	30	60	108	4	7	30	M5	65000	6500
5	50	176	440	58	352	88	176	44	88	160	1,4	30	47	M6	45000	4500
6	160	260	650	78	520	130	260	65	130	240	1,8	42	62	M8	30000	3000
7	500	380	950	114	760	190	380	95	190	350	2,2	57	84	M10	20000	2000

- **Masa del rotor:**

La masa del rotor con el que se va a trabajar, está recogida en la norma ISO 2953 en función del tipo de rotor y el número según norma definido anteriormente en la *tabla 9* que será: $M = 160 \text{ kg}$ (Ver *tabla 9*).

- **Radio del rotor:**

Será la distancia que se recoge en la Norma ISO 2953 que separa el eje principal de giro del rotor patrón con los agujeros donde irán roscadas las masas patrones y tendrá un valor de: $R = 130 \text{ mm}$ (Ver *tabla 9*).

- **Masa patrón del test:**

Para esta primera parte del proceso en el test Umar, se trabajará creando desequilibrios conocidos con la masa patrón de referencia de: 65 g (Ver *apartado 3.3*).

- **Velocidad del test:**

La recogida de datos para este test Umar se realizará para una velocidad de giro de 750 rpm , ya que al trabajar con elementos patrones y previamente calibrados por un certificado, es más conveniente realizar los lanzamientos a elevadas velocidades (superior a 600 rpm).

- **1ª Umar:**

Hace referencia al desequilibrio residual admisible [$\text{g}\cdot\text{mm}$] cuyo valor se obtendrá del producto de la excentricidad (e) por la masa del rotor patrón (P).

$$1^\circ Umar = p.r = e \cdot P = 6\mu\text{m} \cdot 160\text{kg} = 960\mu\text{m}\cdot\text{kg} \quad (\text{EC.6})$$

El valor de la excentricidad se ha obtenido atendiendo al grado de calidad del rotor y a la velocidad de giro del proceso (Ver *apartados 3.4.1*).

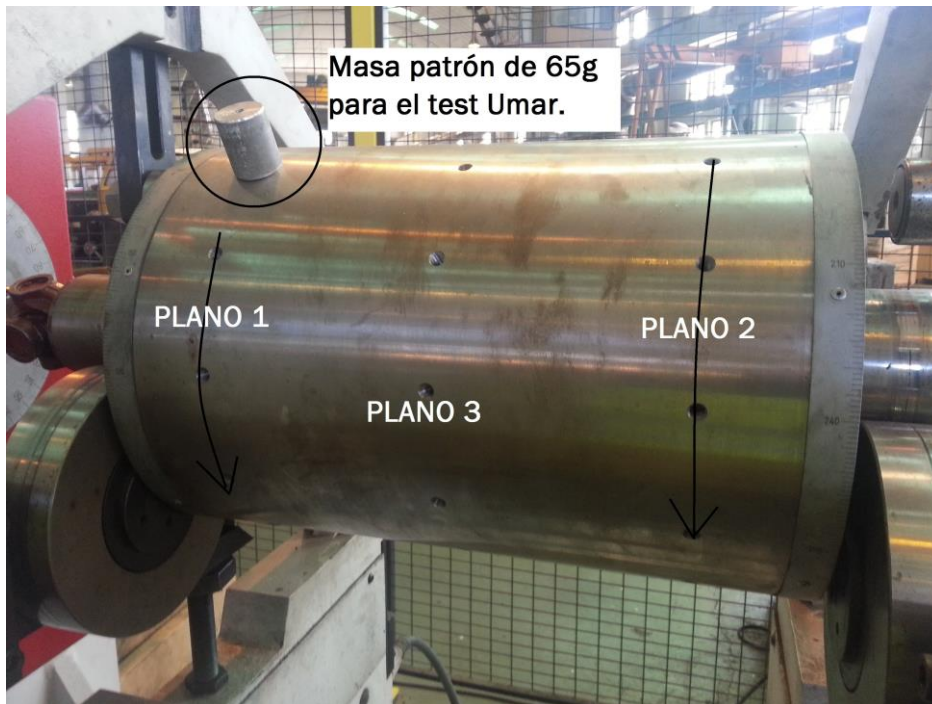
- **2ª Umar:**

Hace referencia al desequilibrio máximo admisible [g] cuyo valor se determinará a partir de la ecuación que relaciona el desequilibrio residual admisible ($1^\circ Umar$) entre el radio del rotor patrón.

$$2^\circ Umar = \frac{1^\circ Umar}{Radio} = \frac{960\mu\text{m}\cdot\text{kg}}{130\text{mm}} = 7,4\text{g} \quad (\text{EC.7})$$

Tras quedar los datos técnicos reflejados en la hoja de cálculo según la Norma ISO 2953, se realizará una ejecución para registrar en (“Lanzamiento 1 de la tabla 10”) el valor del desequilibrio inicial una vez colocado en su posición idónea el rotor patrón. Este valor, quedará definido por cada plano; la cantidad de desequilibrio [g] y el ángulo de desequilibrio [°].

Figura 34. Colocación de la masa patrón de desequilibrio para el test Umar.



En la siguiente tabla expuesta, *tabla 10*, en este test Umar, se realizará la toma de datos de la cantidad de desequilibrio [g] en la equilibradora, se utilizará una masa patrón móvil de 65 g, que se irá colocando sucesivamente en los agujeros del rotor patrón.

Estos agujeros, están desfasados en intervalos de 30° tanto del plano 1 como del plano 2 (serán los planos más cercanos a los apoyos), mientras que el plano 3 (plano central) no se trabajará con él debido a que es una combinación del plano 1 y plano 2, anotando así los valores obtenidos.

Por lo tanto, se realizarán 12 mediciones por plano.

A continuación se registrará la suma y el valor medio de los datos obtenidos en cada plano y después se obtendrá el valor del coeficiente de cada plano donde el valor vendrá dado por la ecuación:

$$\text{Coeficient } e = \frac{\text{Valor.medio}}{\text{Cantidad.desequilibrio}} \quad (\text{EC. 8})$$

Tabla 10. Resultados obtenidos en el proceso del test Umar.

Comprobación de la exactitud: Test U_{MAR}.

Fecha del test: 21/07/2015
 Empresa: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (UVa)
 Solicitante del test: ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES (EII)
 Operador de la máquina: GERMÁN DIEZ GARCÍA
 Test realizado por: GERMÁN DIEZ GARCÍA

Marca de la máquina: KAISER
 Modelo: RM 3000.2 n°: 2156

Tipo de rotor patrón: B Número (según norma): 6
 Masa patrón test: 65 g Masa rotor: 160 kg
 Velocidad del test: 750 r/min Radio rotor: 130 mm
 Excentricidad: 6 µm
 1°Umar (desequilibrio residual admisible) = Masa del rotor x Excentricidad = 960 g·mm
 2°Umar (masa de desequilibrio) = 1°Umar / Radio rotor = 7,4 g

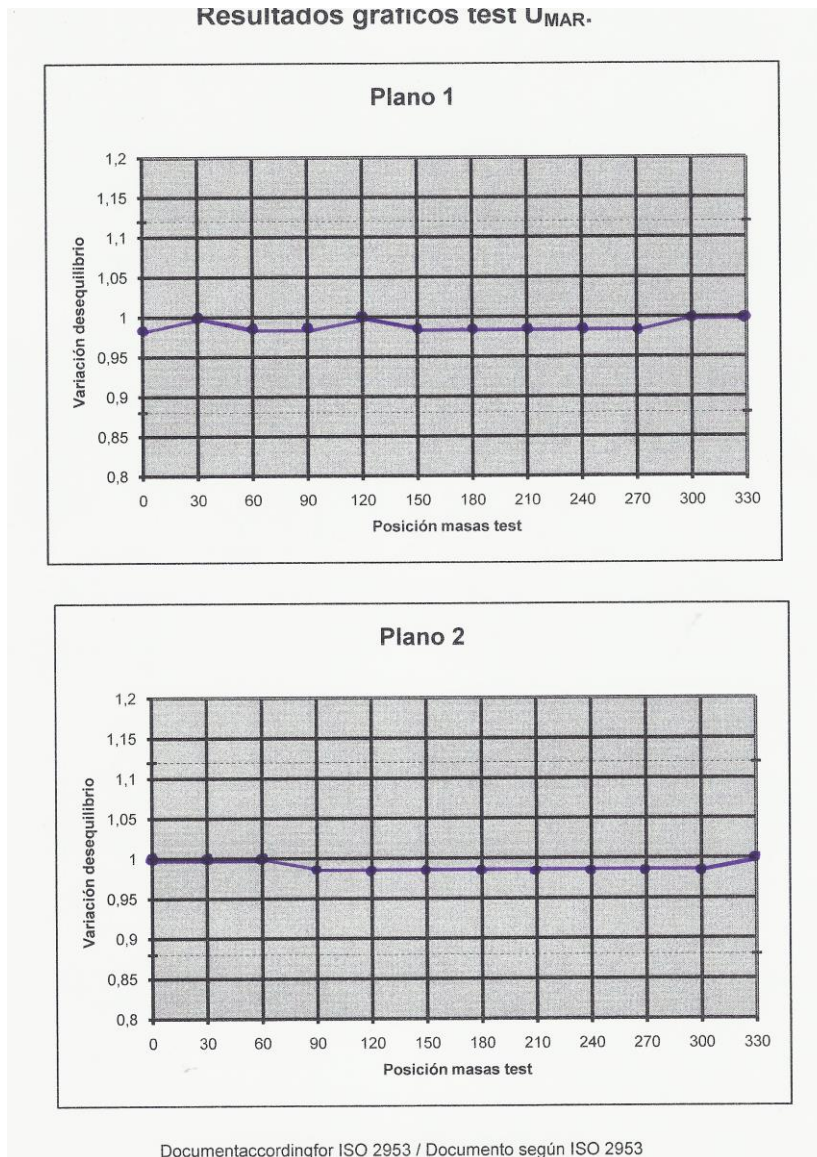
Plano de lectura	Plano 1		Plano 2		Corrección
	Cantidad [g]	Angulo [°]	Cantidad [g]	Angulo [°]	
Lanzamiento 1 desequilibrio inicial	7,70	253°	2,52	199°	No. 1
Lanzamiento 2	—	—	—	—	No. 2
Lanzamiento 3	—	—	—	—	No. 3
Lanzamiento 4	—	—	—	—	No. 4
Lanzamiento 5 desequilibrio final	0,466	200°	0,267	175°	No permitida
Lanzamiento 6					No permitida

Posición de las masas [°]	Cantidad desequilibrio		Coeficiente (*)	
	Plano 1	Plano 2	Plano 1	Plano 2
0°	65,8	64,8	0,99	1,00
30°	65,7	64,9	1,00	1,00
60°	65,8	65,0	0,99	0,99
90°	65,9	65,1	0,99	0,99
120°	65,7	65,1	1,00	0,99
150°	65,9	65,1	0,99	0,99
180°	65,9	65,1	0,99	0,99
210°	65,8	65,1	0,99	0,99
240°	65,8	65,2	0,99	0,99
270°	65,8	65,2	0,99	0,99
300°	65,5	65,2	1,00	0,99
330°	65,3	64,9	1,00	1,00
Suma:	788,9	780,7	(*)NOTA: Dividir el desequilibrio entre el valor medio en cada plano.	
Valor medio:	65,74	65,06		

Document according for ISO 2953 / Documento según ISO 2953

Para finalizar la realización de este test se recogerá en un gráfico los valores obtenidos por los coeficientes en función de cada ángulo y cada plano. Esto, se recogerá en unos gráficos del tipo de la *tabla 11*:

Tabla 11. Gráfico de resultados obtenidos en el test Umar.



NOTA: Una forma rápida de verificar que el procedimiento ha sido correcto es confirmar que los coeficientes obtenidos están comprendidos entre 0,88 y 1,12.

Comprobación de la exactitud, Test Umar:

Se puede concretar por los valores obtenidos tanto en el plano 1 como en el plano 2 que **los resultados son lo suficientemente fiables en cuanto a exactitud** ya que los valores se encuentran recogidos entre 1,12 y 0,88 de variación admisible de desequilibrio.

3.4.4 COMPROBACIÓN DE LA PRECISIÓN. TEST U_{RR} .

El objetivo principal de este test es poder verificar que la distribución de los resultados (*Valores medidos*) no se desvía. Por lo tanto, este test está asociado a dispersión, a la repetibilidad de la medida para que sea posible observar la **precisión** de nuestra máquina equilibradora.

En este segundo test de calibración se tratará de rellenar el informe expuesto en la *tabla 12* atendiendo a una serie de criterios.

Lo primero que se deberá rellenar son los datos informativos sobre la máquina, fecha de realización, operario que ha realizado el procedimiento, etc., como en el test realizado anteriormente del *apartado 3.4.3*.

A continuación se registrará los datos técnicos del rotor patrón, las masas patrones y los parámetros con los que se realizará este test, de los cuales, algunos han sido explicados en el test U_{MAR} anterior y el resto de parámetros se les asigna un valor de:

- **Ufijo:**

Expresará el desequilibrio residual admisible [g·mm] de la masa patrón fija y vendrá expresado como el producto de un término constante para este rotor de 30 mm por el desequilibrio máximo admisible obtenido en el test U_{MAR} ($2^{\circ}U_{MAR}$) [g] donde en el proceso se ha obtenido:

$$U_{fijo} = 30 \cdot 2^{\circ} U_{MAR} = 30mm \cdot 7,4g = 222g \cdot mm \quad (EC.9)$$

- **Masa fija:**

Hace referencia a la masa patrón que durante el proceso del test U_{RR} se mantendrá en una posición fija para la toma de todos los valores. Se realizará con dos masas fijas de 136 g, una por plano (*Ver figura 35*).

Se deberá tener en cuenta que estas masas no estarán en ninguna de las dos formas:

- En un mismo plano.
- En la misma posición angular.

- **Umóvil:**

Expresará el desequilibrio residual admisible [g·mm] de la masa patrón móvil que será cinco veces el valor obtenido en U_{fijo} , por lo que su valor será:

$$U_{móvil} = 5 \cdot U_{fijo} = 5 \cdot 222 \text{ g} \cdot \text{mm} = 1110 \text{ g} \cdot \text{mm} \quad (\text{EC.10})$$

- **Masa móvil:**

Hace referencia a la masa patrón que durante el proceso del test U_{RR} variará su posición para la toma de todos los valores. Se trabajará con una masa móvil de 680g (Ver figura 35).

Tras quedar los datos técnicos reflejados en la hoja, se deberá realizar lanzamientos con las masas fijas colocadas en sus posiciones determinadas y variando la masa móvil en el plano 1 y plano 2 apuntando los valores obtenidos en intervalos de 30° (11 mediciones por plano).

Por último se recoge el valor de la Cantidad del plano 1 y plano 2 que se expresa en la tabla 12 y se anotará en el test U_{RR} :

$$\text{Cantidad.Plano} = \frac{\text{Lectura.del.plano}}{\text{Contrapeso.fijo}} \quad (\text{EC.11})$$

Figura 35. Colocación de las masas patrones fijos y móviles para el test U_{RR} .

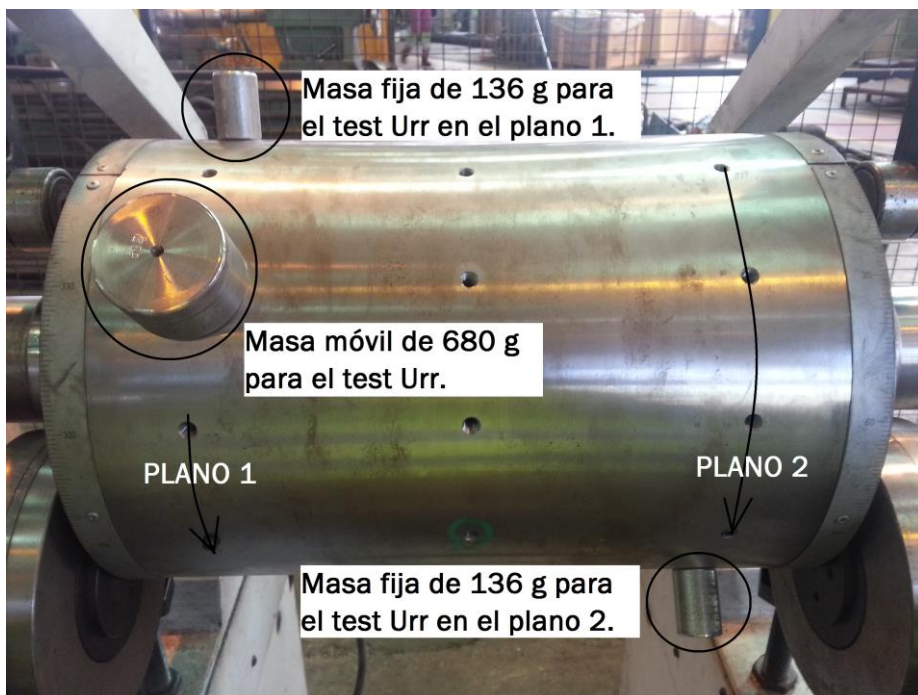


Tabla 12. Resultados obtenidos en el proceso del test Urr.

Comprobación de la precisión: Test U_{RR}

Empresa: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (UVA)
 Solicitante del test: ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES (EII)
 Marca de la máquina: KAISER Modelo: RM 3000-2
 Operador de la máquina: GERMAN DIEZ GARCIA
 Test realizado por: GERMAN DIEZ GARCIA Fecha del test: 21/07/2015

Tipo de rotor patrón: D Número (según norma): 6
 Excentricidad: 6 µm = g·mm/kg Masa rotor: 160 kg
 Desequilibrio residual admisible 1°U_{mar}= 7,4 g

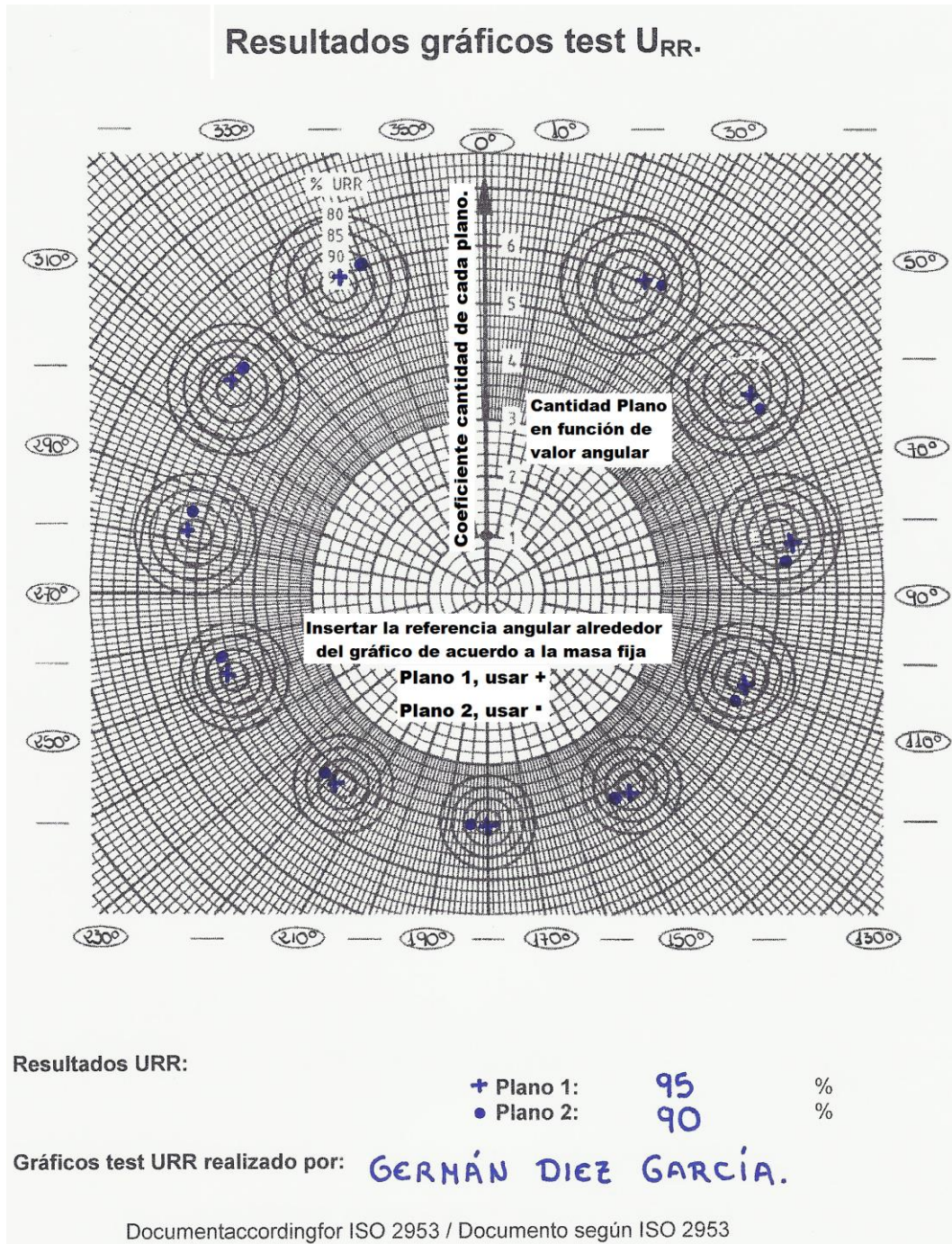
U_{fijo}= 30 xU_{mar}= 222 g·mm
 Radio: 130 mm Masa fija: 156 g
 U_{móvil}= 5xU_{fijo}= 1110 g·mm
 Radio: 150 mm Masa móvil: 680 g

Lanzamientos	Test posición de masas (ángulo)				Lectura desequilibrio		Cantidad Plano 1 (**)	Lectura desequilibrio		Cantidad Plano2 (**)
	Plano 1		Plano 2		Plano 1			Plano 2		
	Fijo	Móvil	Fijo	Móvil	Cantidad [g]	Angulo [°]		Cantidad [g]	Angulo [°]	
1	0°	30°	0°	30°	823	27	6,05	824	30	6,06
2	0°	60°	0°	60°	779	63	5,73	775	56	5,70
3	0°	90°	0°	90°	714	82	5,25	708	83	5,21
4	0°	120°	0°	120°	640	110	4,71	633	114	4,65
5	0°	150°	0°	150°	580	144	4,26	574	148	4,22
6	0°	180°	0°	180°	555	180	4,08	551	184	4,05
7	0°	210°	0°	210°	578	218	4,25	573	222	4,21
8	0°	240°	0°	240°	638	252	4,69	633	256	4,65
9	0°	270°	0°	270°	711	283	5,23	708	286	5,21
10	0°	300°	0°	300°	779	310	5,73	776	314	5,71
11	0°	330°	0°	330°	823	336	6,05	827	340	6,08

(**) Lectura del plano dividido entre Contrapeso Fijo en g.

Para finalizar la realización de este test se ha recogido en un gráfico los valores obtenidos de la cantidad de cada plano en función de cada ángulo. Esto, se recoge en unos gráficos del tipo:

Tabla 13. Gráfico de resultados obtenidos en el test Urr.



Interpretar este gráfico, puede ser una tarea compleja, por eso, se deberá saber que (Ver tabla 13):

Lo primero que se debe realizar es determinar la posición angular del plano 1 y plano 2 de la masa de prueba alrededor de los bordes del gráfico sin confundir los planos. Por lo general suele tomarse como posición angular de referencia 0° , que se sitúa en la casilla que hay encima de la flecha vertical, aunque se puede tomar cualquier otro valor como referencia.

Se utiliza la escala de la cantidad como se muestra en la numeración vertical al lado de la flecha vertical (valores comprendidos en 1-6).

Este gráfico consta de un grupo de 11 circunferencias circunscritas (1 por lanzamiento) en las cuales se tiene que ir anotando dentro de ellas el valor obtenido de la cantidad del plano 1 y plano 2.

Las circunferencias circunscritas, representan el porcentaje de ajuste al que nos aproximamos en cada lanzamiento, por lo que si el valor obtenido cae dentro de la circunferencia interna se estará comprobando que el ajuste de la máquina en la comprobación de ese plano y ángulo es del 95%. Si cae el valor entre esta circunferencia interna y la siguiente, el valor al que hace referencia es de un 90% y así sucesivamente, tratando en la gráfica valores de:

[95% Optimo, 90% Normal, 85% Aceptable, 80% Tolerable].

Por último el resultado del test U_{RR} (en %) se dará por cada plano y será aquel valor obtenido que más se repetirá de los 11 lanzamientos.

Comprobación de la precisión, Test Urr:

Para este test, se puede observar que el plano 1 (Señalado con “+”) y el plano 2 (Señalado con “●”) se encuentran dentro de las diversas circunferencias circunscritas en el ensayo que recoge la Norma ISO 2953, por lo que se puede asegurar que **los resultados obtenidos en ambos planos son lo suficientemente fiables en cuanto a precisión**, aunque se puede decir observando el gráfico que el plano 1 es más preciso que el plano 2.

- **Precisión del Plano 1: 95%**
- **Precisión del Plano 2: 90%**

3.4.5 RESULTADOS DEL PROCESO

Del resultado obtenido en los procesos expuestos anteriormente en el apartado 3.4.3. *Comprobación de la exactitud. Test U_{MAR}* y 3.4.4. *Comprobación de la precisión. Test U_{RR}* , se determina el error permisible.

Error permisible, se define como la cantidad de desequilibrio en este caso que se puede tolerar sin que ello invalide el resultado analítico obtenido en el proceso de equilibrado.

Para el test U_{MAR} el error en masa permisible es $\pm 1\%$.

Para el test U_{RR} el error en masa permisible está directamente relacionado a la información recogida en dicho test y aplicando posteriormente la ecuación:

$$\text{Error permisible} = \pm 0.1 \cdot (100\% - \text{Valor } U_{RR}) \quad (\text{EC.12})$$

NOTA: Si nuestra equilibradora no está dentro de las especificaciones y el error permisible que comete es muy elevado se deberá ajustar atendiendo a los parámetros de la máquina equilibradora.

Este procedimiento se ha realizado utilizando la máquina equilibradora descrita en el apartado 3.1.1.

Figura 36. Máquina equilibradora utilizada para la ejecución del test U_{MAR} y U_{RR} .





ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

4 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CONFIRMACIÓN METROLÓGICA, CALIBRACIÓN.

La calibración de una máquina equilibradora consiste en medir los desequilibrios utilizando unas masas patrones (*Ver apartado 3.2*) de valores conocidos mediante comparación que generen un desequilibrio.

El objeto de este desarrollo es la calibración industrial de un equipo de medida, empleando para ello patrones calibrados que garanticen trazabilidad, donde la trazabilidad se define como la cadena interrumpida de comparaciones, y permite al usuario del medio de medida garantizar la calidad de sus mediciones.

La calibración de este tipo de máquinas se hará en el propio taller debido a sus grandes dimensiones, con condiciones climáticas adversas y de difícil control.

La forma más adecuada para expresar el resultado de una medición obtenida en la equilibradora a partir de una calibración es:

$$M = X \pm U(x) (\%) [\text{ud}]$$

(EC.13)

[Santos 2014]

- **M** = *Magnitud física, desequilibrio.*
- **X** = *Valor más probable que se obtiene de la medida.*
- **U(x)** = *Incertidumbre expandida.*
- **(%)** = *Nivel de significación, nos indica que porcentaje de la producción cumple con esos valores de medida.*
- **[ud]** = *Unidad de medida.*

Se analizará el resultado de una calibración definiendo:

- **“El valor más probable”**. (*Apartado 4.1*).
- **“La Incertidumbre expandida”**. (*Apartado 4.2*).

4.1 OBTENCIÓN DEL VALOR MÁS PROBABLE.

La determinación del valor más probable “X” de la equilibradora, se obtendrá en función del valor medio de las medidas realizadas, más el sumatorio del conjunto de correcciones de calibración de aquellos parámetros que puedan influir en nuestro procedimiento de calibración.

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \bar{X}_i + \sum C_n = \bar{X}_i + C_{Deriva} + C_{Patrón} + C_{resolución} = \bar{X}_i \\ \text{Donde: } \sum C_n = 0. \end{array} \right. \quad (\text{EC.14})$$

Este valor más probable será expresado en unidades de desequilibrio [g].

Como se observa en la ecuación 14, se trabaja con corrección global nula en el valor más probable, por lo que las correcciones de medida se incorporarán posteriormente en la incertidumbre expandida mediante el cálculo de la incertidumbre típica combinada (Ver apartado 4.2.2). Debido a esto, el sumatorio de las correcciones será nulo.

Por lo tanto, el valor más probable será el valor medio de las medidas realizadas.

- **Determinación del valor medio:**

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (\text{EC.15})$$

- *n*: Número de medidas reiteradas en un punto de calibración.
- *X_i*: Resultados obtenidos en un punto de calibración.
- Subíndice *j* medición realizada en un punto de calibración (*j* = 1,2,3,...,n).

4.2 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

La determinación de la incertidumbre expandida “**U(x)**” de la equilibradora, se obtendrá como se observa en la *ecuación 16* como el producto del factor de cobertura “**k**” (Ver apartado 4.2.1) por la incertidumbre típica combinada “**u(x)**” (Ver apartado 4.2.2).

$$U(x) = k \cdot u(x) \quad (\text{EC.16})$$

- $U(x)$ = Incertidumbre expandida.
- K = Factor de cobertura.
- $u(x)$ = Incertidumbre típica combinada.

Esta incertidumbre final será expresada en unidades de desequilibrio [g].

En el informe de calibración donde se muestra el resultado final, se debe indicar la incertidumbre expandida $U(x)$ y su factor de cobertura k asociado (Ver apartado 6).

- Observaciones:

La incertidumbre expandida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura ($k=2$ en nuestro caso) que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente del 95%. La incertidumbre típica combinada se ha determinado conforme al documento EA-4/02.

Para su determinación se han tenido en cuenta las contribuciones debidas a los patrones, al método de calibración y al propio instrumento calibrado.

4.2.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA K

Este factor de cobertura “k”, se puede calcular atendiendo a:

a) Hipótesis de normalidad y fiabilidad. [Santos 2015]

Si se cumple las hipótesis de “NORMALIDAD” y “FIABILIDAD” de la estimación del mensurando (lo que queremos medir), se puede asegurar que nuestra estimación recoge al menos el 95% de la variabilidad, lo cual, el factor de cobertura será $k=2$.

- 1º Hipótesis de normalidad:

La estimación del mensurando debe seguir una estimación normal.

{ Si $N \geq 3$ (donde N son los componentes de la incertidumbre típica combinada de tipo B).

- 2º Hipótesis de fiabilidad:

Está asociado al tamaño muestral.

{ $n \geq 10$ (donde n es el tamaño muestral de medidas realizadas en el proceso de calibración).

b) Ecuación de Welch-Satterthwaite y tabla T-Student. [Santos 2015]

Una vez obtenida la incertidumbre típica combinada (Ver apartado 4.2.2) se calculan los grados efectivos de libertad, V_{eff} , a partir de la incertidumbre típica combinada y sus contribuciones mediante la aplicación de la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$V_{eff} = \frac{u^4(x)}{\sum_{i=1}^n \frac{u(x)_i^4}{gdl_i}} \quad (EC.17)$$

A partir de los grados efectivos de libertad y de la tabla siguiente (Tabla 14) se obtiene el factor K. La tabla está basada en una distribución t-Student evaluada para una distribución de probabilidad del 95,45%.

Tabla 14. T-Student para la obtención del factor de cobertura.

V_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	>100
K	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

4.2.2 INCERTIDUMBRE TÍPICA COMBINADA

La incertidumbre típica combinada “ $u(x)$ ” se obtiene como se observa en la ecuación 18 como la raíz cuadrada del sumatorio de todas las incertidumbres típicas de cada variable que contribuye o afecta al proceso, elevadas al cuadrado.

$$\left\{ \begin{array}{l} u^2(x) = \sum_{i=1}^N u(x)_i^2 \\ u(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u(x)_i^2} = \sqrt{u(\bar{X}_i)^2 + u(C_{Deriva})^2 + u(C_{Resolución})^2 + u(C_{Patrón})^2} \end{array} \right. \quad (EC.18)$$

Cada término expuesto dentro de la raíz será desarrollado a continuación y serán los que determinen el valor de la contribución de la incertidumbre expandida.

4.2.2.1 Componentes tipo A de la incertidumbre típica.

Se considerará de TIPO A (g.d.l = $n - 1$) en nuestro proceso de calibración de la equilibradora aquellas que se obtienen a través del análisis estadístico de observaciones.

a) **Incertidumbre típica debida a la repetibilidad:** [Santos 2015].

$$u(\bar{X}_i) = \sqrt{\frac{s_i^2}{n}} = \frac{s_i}{\sqrt{n}} \quad (EC.19)$$

- S_i = es la desviación típica muestral de todas las indicaciones de las medidas.
- n = individuos de la muestra de datos.

- **Determinación de la desviación típica.**

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2} \quad (EC.20)$$

- S_i : es la desviación típica muestral.

4.2.2.2 Componentes tipo B de la incertidumbre típica.

En la calibración de los equipos de equilibrado, los valores que caigan dentro de esta categoría pueden derivarse de:

- Experiencias o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos obtenidos de calibración y otros certificados.
- Incertidumbres asignadas a los datos de referencia obtenidos de manuales.
- Estudio pero no de observaciones.

Las incertidumbres típicas TIPO B ($g.d.l = \infty$) que se tendrán en cuenta se describen a continuación y dependerán de las correcciones que en el *apartado 4.1* se han supuesto nulas para incluirlas como factores de la incertidumbre expandida.

a) **Incertidumbre típica debida a la temperatura.** [Santos 2015].

Para el cálculo de la calibración de nuestra máquina equilibradora, se desprecia la incertidumbre debida a la temperatura del taller ya que se trabaja con un rotor, ejes o componentes ferroviarios macizos de grandes dimensiones, cuyos incrementos de temperatura en el taller de ± 5 °C se consideran despreciables para producir una dilatación en los equipos de medida que puedan variar el valor del desequilibrio.

Aunque por lo general, este factor debido a la temperatura suele ser de gran importancia en los informe de calibración de los equipos de medida, de ahí de hacer mención de este factor.

b) Incertidumbre típica debida a la resolución del equipo de medida. [Santos 2015].

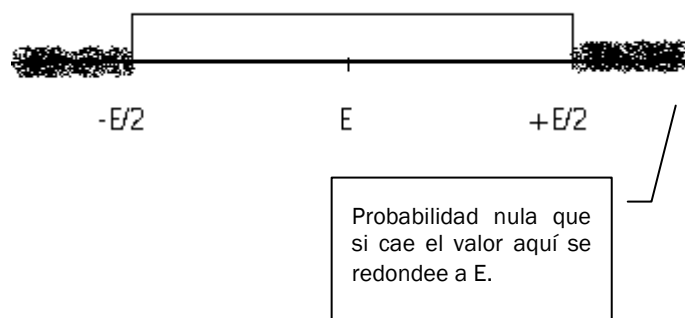
$$u(C_{\text{resolución}}) = \frac{U_{\text{certificado}}}{k} = \frac{E}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{E}{\sqrt{12}} \quad (\text{EC.21})$$

Esto sucede cuando el resultado de la medida que se expresa en la máquina equilibradora se tiene que ajustar por “efecto de redondeo”.

La incertidumbre asociada a la resolución se obtiene de la hipótesis de distribución uniforme en un intervalo $[\pm E/2]$.

Se tendrá una evaluación TIPO B, donde este tipo de incertidumbre se basa en una distribución rectangular.

Figura 37. Distribución rectangular en el redondeo del equipo.



- $E =$ División de escala.

c) Incertidumbre típica debida a la masa de los patrones. [Santos 2015].

En este caso, se tiene que tener en cuenta en nuestro proceso de calibración una incertidumbre típica debida a las masas de los patrones con las que se trabaja para equilibrar la máquina, aplicando la ecuación:

$$u(C_{\text{patrón}}) = \frac{U_{\text{certificado}}}{k} \quad (\text{EC.22})$$

Donde en función de la masa patrón escogida se tiene:

Tabla 15. Valores según certificado de calibración de las masas patrones.

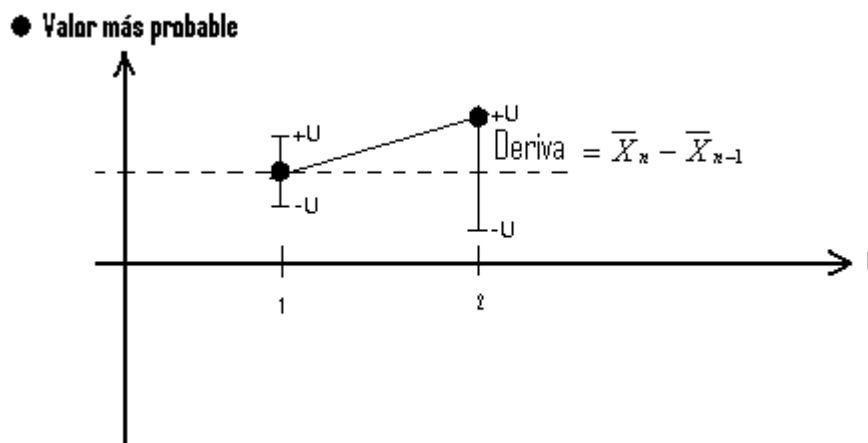
MASA REF	Masa convencional	Incertidumbre expandida	Factor de cobertura (k)
65 g	64,727 g	0,001 g	2
136 g	136,659 g	0,006 g	2
680g	679,254 g	0,006 g	2

d) Incertidumbre típica debida a la deriva de los patrones. [Santos 2015].

Esto sucede al trabajar con masas patrones, cuyo valor de masa convencional fluctúa o varía en el tiempo y no permanece constante debido al desgaste principalmente.

Lo cual, induce en un aumento de la incertidumbre obtenida entre dos periodos de calibración consecutivos.

Figura 38. Efecto de la deriva en el tiempo.



$$u(C_{deriva}) = \frac{2 \cdot Deriva}{\sqrt{12}} \quad (EC.23)$$

Hay que tener en cuenta como ya se ha mencionado que el valor de la deriva fluctúa entre dos o más procesos de calibración consecutivos debido a la variabilidad del valor de masa convencional de las masas patrones.

Este procedimiento consiste en realizar una diferencia entre la calibración actual (última calibración) y la inmediatamente última que has realizado en tu equipo para ver cuanto ha derivado la calibración en el tiempo.

Se tiene que cumplir que:

$$\text{Maxima.deriva.registrada} \leq \text{Deriva.máxima.admisible} \quad (\text{EC.24})$$

- Máxima deriva registrada: El máximo valor entre la diferencia de dos calibraciones consecutivas de la incertidumbre obtenida.
- Deriva máxima admisible: Valor que estima el operario como límite (aceptable) para no sobrepasar la deriva registrada

NOTA: Por lo tanto el valor de deriva en nuestro primer proceso de calibración será nulo y aumentará su valor entre dos o más procesos de calibración.

CONCLUSIÓN:

Tabla 16. Incertidumbres desarrolladas en el proceso de calibración.

	Ecuación	TIPO	g.d.l
$U(\bar{X}_i)$	$u(\bar{X}_i) = \sqrt{\frac{s_i^2}{j}}$	A	n - 1
$U(C_{\text{deriva}})$	$u(C_{\text{deriva}}) = \frac{\text{Deriva}}{\sqrt{3}}$	B	∞
$U(C_{\text{resolución}})$	$u(C_{\text{resolución}}) = \frac{E}{2 \cdot \sqrt{3}}$	B	∞
$U(C_{\text{patrón}})$	$u(C_{\text{patrón}}) = \frac{U_{\text{certificado}}}{k}$	B	∞

- g.d.l = Grados de libertad. Si estos son infinitos significa que la estimación que hemos realizado es suficientemente fiable.
- n = Tamaño muestral, número de mediciones realizadas.

4.3 RELACIÓN ENTRE TOLERANCIA E INCERTIDUMBRE

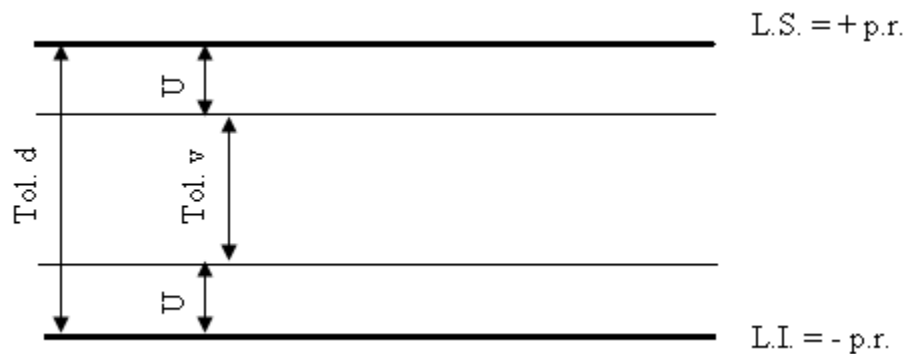
Cuando se realiza la operación de calibración para una máquina equilibradora, se realiza el estudio del “**desequilibrio residual admisible**” o “**tolerancia de equilibrado**” p.r [gmm] (Ver apartado 2.12).

→ p.r [gmm], se obtiene atendiendo a las siguientes pautas: (Ver apartado 2.6.1):

- **1º Paso:** TABLAS DE TIPOS DE ROTORES.
Para determinar el grado de calidad (G). (Ver apartado 3.4.1).
- **2º Paso:** DIAGRAMA DEL GRADO DE CALIDAD.
Para determinar la excentricidad (e). (Ver apartado 3.4.1)
- **3º Paso:** p.r = e · P.
El producto de la excentricidad (e) por la masa del rotor (P) nos dará el valor de la tolerancia de equilibrado (p.r.)

Una vez se ha definido la tolerancia de equilibrado (p.r.) ya se sabe entre que valores se estimarán nuestras mediciones:

Figura 39. Tipos de tolerancias existentes en el proceso.



- **L.S.:** Límite Superior.
- **L.I.:** Límite Inferior.
- **U:** Incertidumbre expandida.
- **Tol.d:** Tolerancia de diseño.
- **Tol.v:** Tolerancia de verificación.

$$\text{Tol.verificación} < \text{Tol.diseño}$$

$$T_{\text{verificación}} = T_{\text{diseño}} - 2\text{Incertidumbre} \quad (\text{EC.25})$$

Tabla 17. Tipos de tolerancias y relación.

	Tolerancia de diseño [Td]	Tolerancia de verificación [Tv]
Abreviatura:	Tol. d	Tol. V
A tener en cuenta en:	Fase de diseño	Fase de control
Ecuación:	$T_d = L.S - L.I$	$T_v = T_d - 2U$

Se debe relacionar los términos: tolerancia de diseño e incertidumbre expandida, por lo que se tratará de acotar la tolerancia de diseño y la incertidumbre entre los valores:

$$3 \leq T / 2U \leq 10 \rightarrow U \leq T / 6 \quad (\text{EC.26})$$

[Santos 2014]

La incertidumbre que deberá cumplir este último valor para no tener que rechazar más piezas del 5%.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

5 INFORME PARA LA TOMA DE DATOS IN SITU

Para poder desarrollar el procedimiento de calibración que plasma este documento se necesita recoger los valores de los datos obtenidos en la equilibradora en función de la masa patrón que se vaya a colocar (ya sea la de 65 g, 136 g o 680 g, *Ver aparatado 3.3 “Patrones necesarios”*) y el ángulo en que esta se ubica en la equilibradora tanto para el plano 1 como para el plano 2.

Para ello se ha generado una plantilla donde se recogerán dichos valores, con la finalidad de mejorar la comodidad del operario a la hora de tomar valores en el taller de la máquina equilibradora y después poder introducirlos a nuestra hoja de cálculo del ordenador para generar los resultados de la calibración que constará de las siguientes partes:

- **Plantilla Plano 1 para masa patrón de 65 g.**

- **Plantilla Plano 2 para masa patrón de 65 g.**

- **Plantilla Plano 1 para masa patrón de 136 g.**

- **Plantilla Plano 2 para masa patrón de 136 g.**

- **Plantilla Plano 1 para masa patrón de 680 g.**

- **Plantilla Plano 2 para masa patrón de 680 g.**

INFORME DE COMPROBACIÓN Y CALIDAD.

TOMA DE DATOS OBTENIDOS IN-SITU PARA LA MÁQUINA EQUILIBRADORA.

Laboratorio de Metrología de Valladolid

Denominación: Toma de datos en equilibradora horizontal.

Marca: KAISER.

Modelo: RM 3000.2.

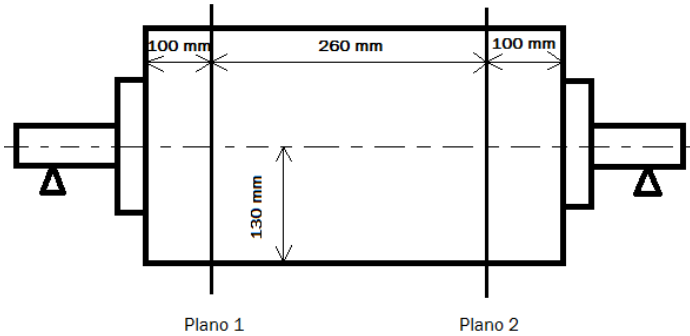
Número de Serie: _____

Solicitante: Universidad de Valladolid (UVa).

Fecha de Calibración: _____

PLANO 1: PARA 65 g.

Parámetros geométricos del rotor patrón.



Velocidad:
750 r.p.m.

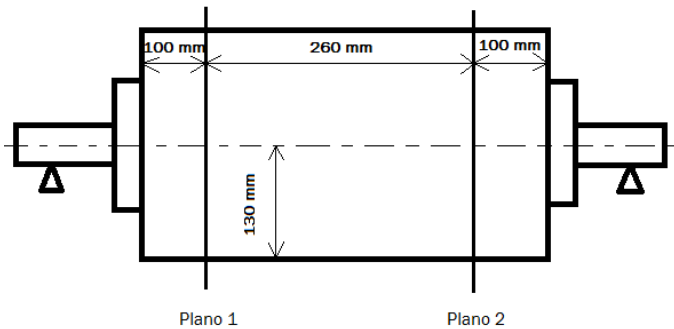
Masa rotor:
160 kg.

Tabla 18. Toma de datos para la masa patrón de 65 g en el plano 1.

Número medidas	Desv. angular	Angulo prueba	Angulo lectura	Peso patrón (Teórico) (g)	Peso lectura (Real) (g)
1	7°	0°	7°	65	65,8
2	4°	30°	34°	65	65,7
3	5°	60°	65°	65	65,8
4	4°	90°	94°	65	65,9
5	5°	120°	125°	65	65,7
6	3°	150°	153°	65	65,9
7	4°	180°	184°	65	65,9
8	4°	210°	214°	65	65,8
9	4°	240°	244°	65	65,8
10	5°	270°	275°	65	65,8
11	4°	300°	304°	65	65,5
12	4°	330°	334°	65	65,3

PLANO 2: PARA 65 g.

Parámetros geométricos del rotor patrón.



Velocidad:

750 r.p.m.

Masa rotor:

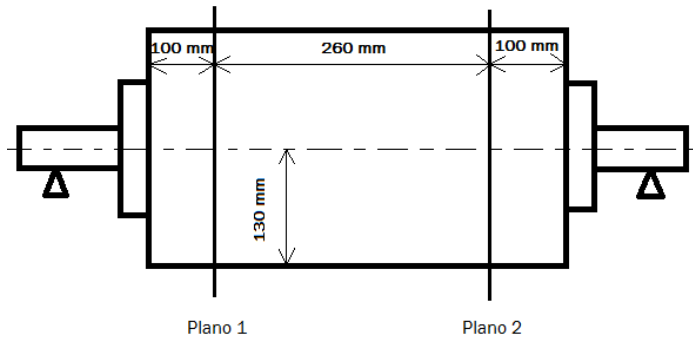
160 kg.

Tabla 19. Toma de datos para la masa patrón de 65 g en el plano 2.

Número medidas	Desv. angular	Angulo prueba	Angulo lectura	Peso patrón (Teórico) (g)	Peso lectura (Real) (g)
1	6°	0°	6°	65	64,8
2	5°	30°	35°	65	64,9
3	5°	60°	65°	65	65,0
4	5°	90°	95°	65	65,1
5	5°	120°	125°	65	65,1
6	6°	150°	156°	65	65,1
7	6°	180°	186°	65	65,1
8	7°	210°	217°	65	65,1
9	7°	240°	247°	65	65,2
10	8°	270°	278°	65	65,2
11	6°	300°	306°	65	65,2
12	6°	330°	336°	65	64,9

PLANO 1: PARA 136 g.

Parámetros geométricos del rotor patrón.



Velocidad:
750 r.p.m.

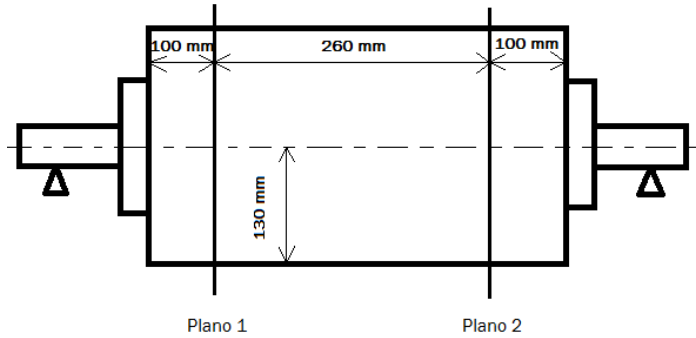
Masa rotor:
160 kg.

Tabla 20. Toma de datos para la masa patrón de 136 g en el plano 1.

Número medidas	Desv. angular	Angulo prueba	Angulo lectura	Peso patrón (Teórico) (g)	Peso lectura (Real) (g)
1	7°	0°	7°	136	136,6
2	7°	30°	37°	136	136,6
3	6°	60°	66°	136	136,4
4	6°	90°	96°	136	136,8
5	5°	120°	125°	136	136,8
6	5°	150°	155°	136	136,8
7	4°	180°	184°	136	136,5
8	4°	210°	214°	136	136,6
9	5°	240°	245°	136	136,6
10	5°	270°	275°	136	136,7
11	5°	300°	305°	136	136,8
12	5°	330°	335°	136	136,4

PLANO 2: PARA 136 g.

Parámetros geométricos del rotor patrón.



Velocidad:
750 r.p.m.

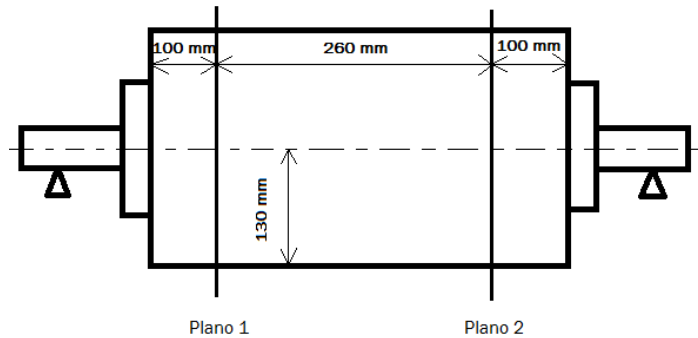
Masa rotor:
160 kg.

Tabla 21. Toma de datos para la masa patrón de 136 g en el plano 2.

Número medidas	Desv. angular	Angulo prueba	Angulo lectura	Peso patrón (Teórico) (g)	Peso lectura (Real) (g)
1	7°	0°	7°	136	136,4
2	6°	30°	36°	136	136,1
3	6°	60°	66°	136	136,2
4	7°	90°	97°	136	136,3
5	8°	120°	128°	136	136,4
6	7°	150°	157°	136	136,3
7	7°	180°	187°	136	136,3
8	8°	210°	218°	136	136,5
9	8°	240°	248°	136	136,5
10	8°	270°	278°	136	136,5
11	6°	300°	306°	136	136,5
12	6°	330°	336°	136	136,4

PLANO 1: PARA 680 g.

Parámetros geométricos del rotor patrón.



Velocidad:
750 r.p.m.

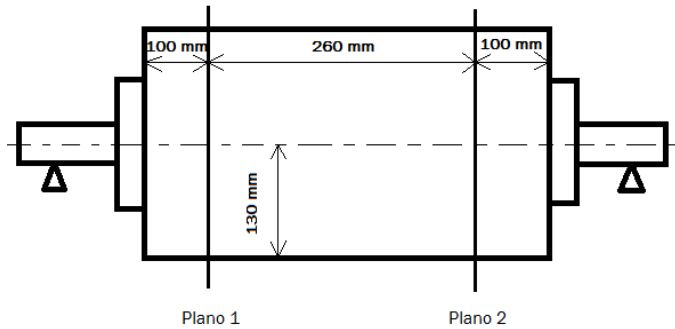
Masa rotor:
160 kg.

Tabla 22. Toma de datos para la masa patrón de 680 g en el plano 1.

Número medidas	Desv. angular	Angulo prueba	Angulo lectura	Peso patrón (Teórico) (g)	Peso lectura (Real) (g)
1	7°	0°	7°	680	681,3
2	8°	30°	38°	680	681,3
3	7°	60°	67°	680	681,2
4	7°	90°	97°	680	680,8
5	6°	120°	126°	680	680,9
6	6°	150°	156°	680	681,0
7	8°	180°	188°	680	681,2
8	8°	210°	218°	680	681,3
9	8°	240°	248°	680	681,2
10	7°	270°	277°	680	681,2
11	6°	300°	306°	680	680,8
12	7°	330°	337°	680	681,0

PLANO 2: PARA 680 g.

Parámetros geométricos del rotor patrón.



Velocidad:

750 r.p.m.

Masa rotor:

160 kg.

Tabla 23. Toma de datos para la masa patrón de 680 g en el plano 2.

Número medidas	Desv. angular	Angulo prueba	Angulo lectura	Peso patrón (Teórico) (g)	Peso lectura (Real) (g)
1	6°	0°	6°	680	680,2
2	5°	30°	35°	680	680,2
3	7°	60°	67°	680	680,5
4	6°	90°	96°	680	680,6
5	5°	120°	125°	680	680,6
6	6°	150°	156°	680	680,6
7	6°	180°	186°	680	680,6
8	7°	210°	217°	680	680,4
9	8°	240°	248°	680	680,7
10	8°	270°	278°	680	680,7
11	7°	300°	307°	680	680,7
12	6°	330°	336°	680	680,2

6 CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA EQUILIBRADORA

Una vez comprobado que nuestra máquina equilibradora cumple las pruebas de ajuste según la norma ISO 2953, mediante las comprobaciones del **test U_{MAR}** y del **test U_{RR}** (Ver apartados 3.4.3 y 3.4.4), y recogido el informe para la toma de datos in situ (Ver apartado 4) se deberá realizar un informe de calibración para obtener el valor más probable de los resultados que recoge la equilibradora.

Para ello, previamente se deberá haber realizado la **calibración de la balanza de precisión** (recogido en el Anexo 1) con la que se realizará después la **calibración de las masas patrones** que se colocan en el rotor por comparación con otras masas patrones (de calidad superior, clase F2) que generarán un desequilibrio conocido en la máquina equilibradora (recogido en el Anexo 2).

Para la calibración de la máquina equilibradora, se tendrá en cuenta como incertidumbres típicas de la corrección del proceso (Ver apartado 4.2.2):

- Incertidumbre típica debida a repetibilidad del proceso.
- Incertidumbre típica de la corrección por la deriva de los patrones.
- Incertidumbre típica de la corrección por la resolución del equipo.
- Incertidumbre típica debida al patrón.

Se analizarán los desequilibrios producidos por las masas patrones que se colocan en el rotor de 65 g, 136 g y 680 g, donde se han generado unas plantillas de calibración para poder obtener la incertidumbre expandida a partir de las incertidumbres típicas (Ver apartado 4.2.2) para el plano 1 y el plano 2.




 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios. TFG
---	--

Figura 40. Portada informe de calibración máquina equilibradora KAISER.

 <small>ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES</small>	 <small>UNIVERSIDAD DE VALLADOLID</small>	Número: ----- <i>Number</i>	<h2>INFORME DE CALIBRACIÓN</h2>
		Página 1 de 2	
<h3 style="text-align: center;">Laboratorio de Metrología de Valladolid</h3> <p style="text-align: center;">Paseo del Cauce</p> <p style="text-align: center;"> <i>Telefono: 661157145</i> <i>E-mail: german_diezg@hotmail.com</i> </p>			
Equipo /Instrumento Nº : ----- <i>Instrument Number</i>			
Denominación : EQUILIBRADORA HORIZONTAL <i>Instrument</i>			
Marca : KAISER <i>Manufacturer</i>			
Modelo: RM 3000.2 <i>Model</i>			
Número de Serie: ----- <i>Serial number</i>			
Solicitante : Universidad de Valladolid (UVa) <i>Customer</i>			
Fecha/s de Calibración: 21/07/2015 <i>Date/s of calibration</i>			
Signatarios/s autorizado/s: <i>Authorized signatory/ies</i>		Fecha de emisión: <i>Date of issue</i>	
		21/07/2015	
GERMÁN DIEZ GARCÍA <i>Colaborador del Laboratorio de Metrología de Valladolid</i>			

Este documento se expide de acuerdo con las normas nacionales e internacionales de calibración y expresa fielmente el resultado de las medidas realizadas. Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.

This document is issued according to the condition of national and international standards of calibration, and it is an accurate of the results of measurement performed. This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory.

Figura 4.1. Contraportada informe de calibración máquina equilibradora KAISER.



INFORME DE CALIBRACIÓN

Número: ----
Number

Laboratorio de Metrología de Valladolid

Procedimiento: VER HOJAS ADJUNTAS

La calibración se ha realizado utilizando el procedimiento indicado en hoja adjunta, estableciendo la relación existente entre las lecturas del equipo y de las medidas del patrón utilizado, tras permanecer el tiempo suficiente para permitir la igualación y estabilización de temperaturas entre equipo y patrón.

Cálculo de incertidumbres: VER HOJAS ADJUNTAS

La incertidumbre de calibración indicada en hoja adjunta se ha calculado a partir de las componentes de las incertidumbres de los patrones, del procedimiento de calibración, de las magnitudes de influencia y de las contribuciones del equipo de equilibrado, para una distribución normal correspondiente a una probabilidad del 95,45% (K=2), de acuerdo a las recomendaciones indicadas por el CEM y el documento adjunto para las máquinas equilibradoras.

Trazabilidad:

VER HOJAS ADJUNTAS

Condiciones ambientales durante la calibración: VER HOJAS ADJUNTAS

Temperatura: H.R : .

:Resultados de la Calibración

VER HOJAS ADJUNTAS

Incertidumbre expandida:

VER HOJAS ADJUNTAS

Observaciones:

VER HOJAS ADJUNTAS

Realizado por:

Fecha de toma de medidas:

21/07/2015

GERMÁN DIEZ GARCÍA

Cargo: COLABORADOR DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

Tabla 24. Resultados del informe de calibración para el plano 1.





  ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Universidad de Valladolid		INFORME DE CALIBRACIÓN PLANO 1 DE MÁQUINAS EQUILIBRADORAS				
DATOS DEL EQUIPO:						
Denominación:	EQUILIBRADORA HORIZONTAL			Nº identificación:	----	
Marca:	KAISER		Modelo:	RM 3000.2	Nº de serie:	----
Características:	MEDIDAS (Según Norma): A= 130 mm B= 260 mm C= 130 mm r1= 130mm r2= 130 mm					
Método calibración:	Obtención valor más probable			Certificado de calibración:	----	
Punto de calibración	1	2	3	4	5	6
Nominal	65,000	136,000	680,000			
MEDIDAS OBTENIDAS	x1	65,800	136,600	681,300		
	x2	65,700	136,600	681,300		
	x3	65,800	136,400	681,200		
	x4	65,900	136,800	680,800		
	x5	65,700	136,800	680,800		
	x6	65,900	136,800	681,000		
	x7	65,900	136,500	681,200		
	x8	65,800	136,600	681,300		
	x9	65,800	136,600	681,200		
	x10	65,800	136,700	681,200		
	x11	65,500	136,800	680,800		
	x12	65,300	136,400	681,000		
Media	65,742	136,633	681,092			
Desviación al nominal	-0,7417	-0,6333	-1,0917			
Desviación típica S	0,1782	0,1497	0,2021			
Incertidumbre de repetibilidad	0,0514	0,0432	0,0583			
Incertidumbre deriva patrones	1º Calibración	1º Calibración	1º Calibración			
Incertidumbre resolución equipo	0,0289	0,2887	0,2887			
Incertidumbre debida al patrón	0,0005	0,003	0,003			
Incertidumbre típica combinada	0,05898	0,29191	0,29453			
$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}}$	19,025	22872,369	7148,510			
Factor de cobertura "K"	2,28	2,00	2,00			
Incertidumbre expandida	0,13	0,58	0,59			
Condiciones ambientales:	• Temperatura ambiente de 20 ± 2 °C. • Humedad Relativa: (20 ~ 80) % HR.					
Incertidumbre de calibración (expandida) ± 0,59			k= 2			
Fecha: 21/07/2015	Observaciones:					
Nombre y firma:	Germán Díez García					

Tabla 25. Resultados del informe de calibración para el plano 2.

 		INFORME DE CALIBRACIÓN PLANO 2 DE MÁQUINAS EQUILIBRADORAS				
DATOS DEL EQUIPO:						
Denominación:	EQUILIBRADORA HORIZONTAL			Nº identificación:	----	
Marca:	KAISER	Modelo:	RM 3000.2	Nº de serie:	----	
Características:	MEDIDAS (Según Norma): A= 130 mm B= 260 mm C= 130 mm r1= 130mm r2= 130 mm					
Método calibración:	Obtención valor más probable			Certificado de calibración:	----	
Punto de calibración	1	2	3	4	5	6
Nominal	65,000	136,000	680,000			
MEDIDAS OBTENIDAS	x1	64,800	136,400	680,200		
	x2	64,900	136,100	680,200		
	x3	65,000	136,200	680,500		
	x4	65,100	136,300	680,600		
	x5	65,100	136,400	680,600		
	x6	65,100	136,300	680,600		
	x7	65,100	136,300	680,600		
	x8	65,100	136,500	680,400		
	x9	65,200	136,500	680,700		
	x10	65,200	136,500	680,700		
	x11	65,200	136,500	680,700		
	x12	64,900	136,400	680,200		
Media	65,058	136,367	680,500			
Desviación al nominal	-0,0583	-0,3667	-0,5000			
Desviación típica S	0,1311	0,1303	0,2000			
Incertidumbre de repetibilidad	0,0379	0,0376	0,0577			
Incertidumbre deriva patrones	1º Calibración	1º Calibración	1º Calibración			
Incertidumbre resolución equipo	0,0289	0,2887	0,2887			
Incertidumbre debida al patrón	0,0005	0,003	0,003			
Incertidumbre típica combinada	0,04761	0,29113	0,29441			
$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}}$	27,519	39514,162	7437,544			
Factor de cobertura "K"	2,13	2,00	2,00			
Incertidumbre expandida	0,10	0,58	0,59			
Condiciones ambientales: • Temperatura ambiente de 20 ± 2 °C. • Humedad Relativa: (20 ~ 80) % HR.						
Incertidumbre de calibración (expandida) ± 0,59 k= 2						
Fecha: 21/07/2015 Observaciones:						
Nombre y firma: Germán Díez García						

Se puede observar en las tablas con los resultados de la calibración para cada plano en las que se ha obtenido como valor de la incertidumbre expandida y la media de las medidas para cada masa:

Plano 1:

Media	65,742	136,633	681,092
-------	--------	---------	---------

$v_{eff} = \frac{u(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^2}{v_i}}$	19,025	22872,369	7148,510		
Factor de cobertura "K"	2,28	2,00	2,00		
Incertidumbre expandida	0,13	0,58	0,59		

Condiciones ambientales: • Temperatura ambiente de 20 ± 2 °C • Humedad Relativa: (20 ~ 80) % HR.

Incertidumbre de calibración (expandida) ± 0,59	k= 2
---	------

Fecha: 21/07/2015

Nombre y firma: Germán Díez García

NOTA: Se recogerá la incertidumbre expandida más desfavorable (0,59 g en este caso) realizada en el plano 1 entre las tres posibles de cada masa patrón utilizada (0,13 g, 0,58 g, 0,59 g).

Masa patrón de 65g:

$$M = 65,74 \pm 0,59 \text{ g}$$

Masa patrón de 136g:

$$M = 136,63 \pm 0,59 \text{ g}$$

Masa patrón de 680g:

$$M = 681,09 \pm 0,59 \text{ g}$$

Plano 2:

Media	65,058	136,367	680,500
-------	--------	---------	---------

$v_{eff} = \frac{u^*(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}}$	27,519	39514,162	7437,544		
Factor de cobertura "K"	2,13	2,00	2,00		
Incertidumbre expandida	0,10	0,58	0,59		

Condiciones ambientales: • Temperatura ambiente de 20 ± 2 °C • Humedad Relativa: (20 ~ 80) % HR.

Incertidumbre de calibración (expandida) ± 0,59

k= 2

Fecha: 21/07/2015

Observaciones:

Nombre y firma: Germán Díez García

NOTA: Se recogerá la incertidumbre expandida más desfavorable (0,59 g en este caso) realizada en el plano 2 entre las tres posibles de cada masa patrón utilizada (0,10 g, 0,58 g, 0,59 g).

Masa patrón de 65g:

$$M = 65,06 \pm 0,59 \text{ g}$$

Masa patrón de 136g:

$$M = 136,37 \pm 0,59 \text{ g}$$

Masa patrón de 680g:

$$M = 680,50 \pm 0,59 \text{ g}$$



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

7 CONCLUSIONES

Como resultado del estudio de las máquinas equilibradoras presentado, es posible concluir que es necesario adquirir un conocimiento teórico previo suficiente para poder realizar procesos de ajuste y calibración de manera satisfactoria y así poder interpretar los valores obtenidos durante estos procesos.

Por otro lado, para interpretar los valores de ajuste obtenidos en el test de exactitud (U_{mar}) y en el test de precisión (U_{rr}) ha sido necesario desglosar y profundizar en el estudio de:

- Normas **ISO 1925** (*Mechanical vibration – Balancing – Vocabulary*. “Vibraciones mecánicas – Equilibrado – Vocabulario).
- Norma **ISO 1940** (*Mechanical Vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state*. “Vibraciones mecánicas – Requerimientos de calidad de equilibrado para rotores (rígidos) constante”)

Y sobre todo tener muy en cuenta:

- Norma **ISO 2953** (*Mechanical vibration – Balancing machines – Description and evaluation*. “Vibraciones mecánicas – Máquinas equilibradoras – Descripción y evaluación”).

Se ha desarrollado un diseño para llevar a cabo un protocolo de calibración del valor de la medida de los resultados obtenidos y así poder obtener un rango de valores del valor más probable acotados por unos límites superior e inferior. Además, se ha podido concretar en la realización del ajuste de nuestra máquina equilibradora que ésta respondía tanto de manera exacta como precisa a la hora de generar valores de desequilibrio de un elemento rotativo.

Junto a la definición del protocolo de calibración se han diseñados unas hojas de cálculo con una serie de plantillas donde poder introducir los datos registrados de manera clara y ordenada para cada plano de corrección en la equilibradora y cada masa patrón existente.

Por último, quiero destacar el apoyo recibido en la empresa donde se ha podido realizar el manejo de la máquina equilibradora para obtener así los resultados mostrados en este trabajo y conocer su funcionamiento.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

8 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Entre las acciones que podrían realizarse para continuar profundizando en el desarrollo de este trabajo se pueden enumerar las siguientes:

Ampliar el estudio realizado en este trabajo sobre la precisión, exactitud y calibración de la equilibradora KAISER RM 3000.2 al resto de equilibradoras existentes en la empresa que se hizo mención en el *apartado 3.1 "Tipos de equilibradoras de trabajo"*:

- **Equilibradora Schenck KHGW 20-B.**
- **Equilibradora Hofmann HL-25.**

Incrementar el estudio y desarrollo de las equilibradoras de eje no rígido y las equilibradoras de eje vertical. Aunque las equilibradoras horizontales de eje rígido tratadas en este trabajo son las más habituales, los tipos de máquinas para realizar un proceso de equilibrado es muy amplia.

BIBLIOGRAFÍA

- [APUCA] *Documentación técnica sobre el equilibrado estático.*
Disponible en:
<HTTP://WWW.APUCA.COM.AR/NOTAS/BALANCEO.HTM>
- [Calibración Balanza] *Hoja de datos e informe de calibración de dinamómetros, basculas, pesas y prensas.* Documentación facilitada por RENFE Fabricación y Mantenimiento para la calibración de la báscula de precisión. Abril 2015.
- [Calibración Masas] *Hoja de datos e informe de calibración de dinamómetros, basculas, pesas y prensas.* Documentación facilitada por RENFE Fabricación y Mantenimiento para la calibración de las masas patrones. Abril 2015.
- [ELETTRORAVA] *Documentación técnica sobre equilibrado.* Disponible en:
<HTTP://WWW.ELETTRORAVA.ES/ESPANOL/DOCUM/DOCUM.HTM>.
- [ELKIN 2011] Arregocés Duarte, Elkin Isidoro. *Diseño e implementación de guías de prácticas para el análisis de vibraciones en un sistema rotor kit.* Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería Mecánica Bucaramanga 2011.
- [HOFMANN] *Manual de la equilibradora HOFMANN HL-25.* Documentación facilitada por RENFE Fabricación y mantenimiento.
- [ISO 1925] Norma ISO 1925:2001. *Mechanical vibration – Balancing – Vocabulary.* “Vibraciones mecánicas – Equilibrado – Vocabulario”.
- [ISO 1940] Norma ISO 1940-1:2003. *Mechanical Vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state.* “Vibraciones mecánicas – Requerimientos de calidad de equilibrado para rotores (rígidos) constante”.
- [ISO 2953] Norma ISO 2953:1999. *Mechanical vibration – Balancing machines – Description and evaluation.* “Vibraciones mecánicas – Máquinas equilibradoras – Descripción y evaluación”.

- [KAISER] *Manual de la equilibradora KAISER RM 3000.2.* Documentación facilitada por RENFE Fabricación y mantenimiento.
- [Santos 2014] Santos Martín, Francisco Javier. *Cálculo de la Incertidumbre de Medida conforme EA4/02.* Procesos de fabricación II. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid. Noviembre 2014.
- [Santos 2015] Santos Martín, Francisco Javier. *Estimación de la incertidumbre.* Metrología avanzada y calidad industrial. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid. Marzo de 2015.
- [Santos S.I.] Santos Martín, Francisco Javier. *Recomendaciones de uso del S.I. de unidades.* Metrología avanzada y calidad industrial. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid. Marzo de 2015.
- [SCHENCK] *Manual de la equilibradora SCHENCK KHGW 20-B.* Documentación facilitada por RENFE Fabricación y Mantenimiento.
- [VIBRATEC] *Documentación técnica sobre el equilibrado dinámico.*
Disponible en:
[HTTP://WWW.VIBRATEC.NET/PAGES/SERVICIOS2_BALDINAMICO.HTML](http://www.vibratec.net/pages/servicios2_baldinamico.html)

ANEXOS

ANEXO 1. CALIBRACIÓN DE LA BALANZA DE PRECISIÓN.

Como ya se ha mencionado anteriormente, previamente a realizar la calibración de la equilibradora se debe comprobar la incertidumbre de las masas patrones y para ello se deberá tener el instrumento de medida correctamente calibrado, en este caso la balanza de precisión.

Para la realización de la calibración de la balanza de precisión se ha tenido en cuenta como incertidumbres típicas de la corrección del proceso:

- Incertidumbre típica debida a repetibilidad del proceso.
- Incertidumbre típica debida al descentramiento.
- Incertidumbre típica de la corrección debida al patrón.
- Incertidumbre típica de la corrección por la resolución del equipo.

Figura 42. Portada para el informe de calibración de la balanza de precisión.



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

INFORME DE CALIBRACIÓN

Denominación: **BALANZA DE PRECISIÓN**

Marca: **JADEVER**

Modelo: **LPW-3015**

Número de serie: -----

Solicitante: -----

Fecha de calibración: -----

Procedimiento: VER HOJAS ADJUNTAS:

La calibración se ha realizado utilizando el procedimiento indicado en hoja adjunta, estableciendo la relación existente entre las lecturas del equipo y de las medidas del patrón utilizado, tras permanecer el tiempo suficiente para permitir la igualación y estabilización de temperaturas entre equipo y patrón.

Cálculo de Incertidumbres: VER HOJAS ADJUNTAS:

La incertidumbre de calibración indicada en hoja adjunta se ha calculado a partir de las componentes de las incertidumbres de los patrones, del procedimiento de calibración, de las magnitudes de influencia y de las contribuciones del equipo de equilibrado, para una distribución normal correspondiente a una probabilidad del 95,45% (K=2), de acuerdo a las recomendaciones indicadas por el CEM y la instrucción operativa para máquinas equilibradoras.

Trazabilidad: VER HOJAS ADJUNTAS:

Condiciones ambientales durante la calibración (Temperatura y humedad relativa)
VER HOJAS ADJUNTAS:

:Resultados de la Calibración

VER HOJAS ADJUNTAS

Incertidumbre expandida: VER HOJAS ADJUNTAS

Observaciones: VER HOJAS ADJUNTAS:

Realizado por:
GERMÁN DIEZ GARCÁ

Fecha de toma de medidas:





ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

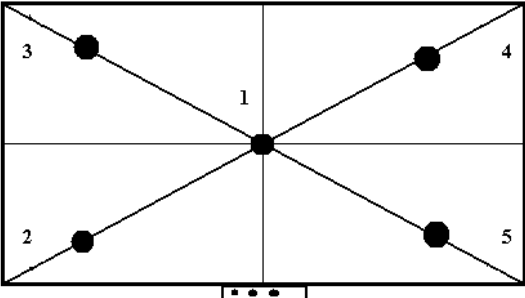
Tabla 26. Informe de calibración para la balanza de precisión por los métodos de la empresa.

  ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Universidad de Valladolid		HOJA DE DATOS E INFORME DE CALIBRACIÓN DE BALANZAS DE PRECISIÓN					
DATOS DEL EQUIPO:							
Denominación:	Weighing Balance			Nº identificación:			
Marca:	JADEVER	Modelo:	LPW-3015	Nº serie:			
Características:	F.E: 3000g						
Div. Escala:	0,2 g						
Método calibración:	Informe de calibración:						
DATOS DEL PATRÓN:							
Denominación:	JUEGOS DE MASA PATRÓN			Clase F2			
Marca:	---	Modelo:		Nº serie:			
Incertidumbre:	S/C			ko = 2			
Punto de calibración		1	2	3	4	5	6
Nominal	P	10,0	50,0	200,0	500,0	1000,0	2000,0
MEDIDAS OBTENIDAS	P ₀	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,4
$I_{\max} = (P_0 - P_1)_{\max}$		0,0	0,0	0,2	0,4	0,8	1,6
I patrón (Tm)		0,0002	0,0003	0,0010	0,0025	0,0050	0,0100
I medida (Tm)		0,0001	0,0002	0,1155	0,2309	0,4619	0,9238
Condiciones ambientales:		Temperatura ambiente: 22,7 °C Humedad relativa: 37%					
Incertidumbre de calibración ± 1,84g				k= 2			
Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión							
- REPETIBILIDAD DE LAS LECTURAS							
16 pesas de clase F2 o inferior de calidad según OIML R111							
Fecha: 21-05-2013							
Nombre y firma:				Visto bueno:			

[Calibración Balanza]

Tabla 27. Procedimiento del efecto de descentramiento de la balanza por método propuesto.

Punto de calibración		1	2	3	4	5	6
Nominal		10,0	50,0	200,0	500,0	1000,0	2000,0
MEDIDAS OBTENIDAS (Posicionamiento)	1	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,4
	2	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,4
	3	10,0	50,0	199,8	499,8	999,4	1998,6
	4	10,0	50,0	199,8	499,6	999,4	1998,6
	5	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,4
Diferencia max.		0,000	0,000	0,200	0,200	0,600	1,400



Fecha: 23/05/2013

Nombre y firma:

Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión
- EFECTO DEL DESCENTRAMIENTO DE CARGA

Visto bueno



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales
de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

Tabla 28. Informe de calibración para la balanza de precisión por método propuesto.

Punto de calibración		1	2	3	4	5	6	
Nominal		10,0	50,0	200,0	500,0	1000,0	2000,0	
MEDIDAS OBTENIDAS	x1	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,6	
	x2	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,4	
	x3	10,0	50,0	200,0	499,6	999,2	1998,4	
	x4	10,0	49,8	199,8	499,6	999,4	1998,4	
	x5	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,6	
	x6	10,0	50,0	200,0	499,6	999,2	1998,6	
	x7	10,0	50,0	199,8	499,6	999,2	1998,4	
	x8	10,0	50,0	199,8	499,6	999,4	1998,6	
	x9	10,0	50,0	199,8	499,8	999,2	1998,4	
	x10	10,0	50,0	200,0	499,6	999,4	1998,4	
Media		10,00	49,98	199,86	499,62	999,26	1998,48	
Desviación al nominal		0,00	0,02	0,14	0,38	0,74	1,52	
Desviación típica S		0,000	0,063	0,097	0,063	0,097	0,103	
Incertidumbre de repetibilidad		0,000	0,020	0,031	0,020	0,031	0,033	
Incertidumbre descentramiento		0,000	0,000	0,288	0,288	0,288	0,288	
Incertidumbre resolución equipo		0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	
Incertidumbre debida al patrón		0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,005	
Incertidumbre típica combinada		0,058	0,062	0,306	0,367	0,519	0,926	
Factor de cobertura "K"		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
Incertidumbre expandida		0,1155	0,1244	0,6124	0,7343	1,0387	1,8520	
Condiciones ambientales:		• Temperatura ambiente:					• Humedad Relativa:	
Incertidumbre de calibración (expandida) ± 1,85g							k= 2	
Fecha: 23/05/2013		Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión						
Nombre y firma:		- CORRECCIÓN DE CALIBRACIÓN						
		Visto bueno						

ANEXO 2. CALIBRACIÓN DE LAS MASAS DEL ROTOR.

Como ya se ha mencionado anteriormente, una vez calibrada la báscula de precisión, se realiza la calibración de las masas que se colocan en el rotor patrón para generar un desequilibrio conocido.

Se realizará cuatro informes de calibración, uno por cada masa patrón existente (*Ver apartado 3.2*):

- Un informe de calibración para la masa patrón de 65 g.
- Dos informes de calibración para las masas patrones de 136 g, debido a que se dispone para las pruebas de dos masas idénticas de éste tipo.
- Un informe de calibración para la masa patrón de 680 g.

Para la realización de la calibración de las masas del rotor, se tendrá en cuenta como incertidumbres típicas de la corrección del proceso:

- Incertidumbre típica debida a repetibilidad del proceso.
- Incertidumbre típica debida al descentramiento.
- Incertidumbre típica de la corrección debida al patrón.
- Incertidumbre típica de la corrección por la resolución del equipo.


 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios. TFG
---	---

Figura 43. Portada para el informe de calibración de las masas de la equilibradora.

 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	 Universidad de Valladolid	<h2 style="margin: 0;">INFORME DE CALIBRACIÓN</h2>
---	---	--

Denominación:	MASAS DE LA EQUILIBRADORA
Marca:	-----
Modelo:	-----
Número de serie	-----
Solicitante:	-----
Fecha de calibración:	-----

Procedimiento: VER HOJAS ADJUNTAS:

La calibración se ha realizado utilizando el procedimiento indicado en hoja adjunta, estableciendo la relación existente entre las lecturas del equipo y de las medidas del patrón utilizado, tras permanecer el tiempo suficiente para permitir la igualación y estabilización de temperaturas entre equipo y patrón.

Cálculo de Incertidumbres: VER HOJAS ADJUNTAS:

La incertidumbre de calibración indicada en hoja adjunta se ha calculado a partir de las componentes de las incertidumbres de los patrones, del procedimiento de calibración, de las magnitudes de influencia y de las contribuciones del equipo de equilibrado, para una distribución normal correspondiente a una probabilidad del 95,45% (K=2), de acuerdo a las recomendaciones indicadas por el CEM y la instrucción operativa para máquinas equilibradoras.

Trazabilidad: VER HOJAS ADJUNTAS:

Condiciones ambientales durante la calibración (Temperatura y humedad relativa)
VER HOJAS ADJUNTAS:

:Resultados de la Calibración

VER HOJAS ADJUNTAS



Incertidumbre expandida:	VER HOJAS ADJUNTAS
---------------------------------	---------------------------

Observaciones: VER HOJAS ADJUNTAS:

Realizado por:
GERMÁN DIEZ GARCÁ

Fecha de toma de medidas:

Tabla 29. Informe de calibración para la masa de 65 g.

  ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Universidad de Valladolid		HOJA DE DATOS E INFORME DE CALIBRACIÓN DE PESAS					
DATOS DEL EQUIPO:							
Denominación:	Weighing Balance				Nº identificación:		
Marca:	JADEVER	Modelo:	LPW-3015	Nº serie:			
Características:	F.E: 3000g						
Div. Escala:	0,2 g						
Método calibración:	Informe de calibración:						
DATOS DEL PATRÓN:							
Denominación:	JUEGOS DE MASA PATRÓN				Clase F2		
Marca:	---	Modelo:		Nº serie:			
Incertidumbre:	S/C				k ₀ = 2		
Punto de calibración	1	2	3	4	5	6	
Nominal	P	65,0	65,0	64,8	65,0	64,8	65,0
MEDIDAS OBTENIDAS	P ₀	64,8	64,8	64,6	64,6	64,6	64,8
$I_{\max} = (P_0 - P_i)_{\max}$		0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2
I patrón (Tm)		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
I medida (Tm)		0,1155	0,1155	0,1155	0,2309	0,1155	0,1155
Condiciones ambientales: Temperatura ambiente: 21,9 °C Humedad relativa: 45%.							
Incertidumbre de calibración ± 0,46g k= 2							
Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión Calibración de masa patrón de 65g equilibradora. (50+10+5) 16 pesas de clase F2 o inferior de calidad según OIML R111							
Fecha: 21-05-2013							
Nombre y firma:				Visto bueno:			

[Calibración Masas]





ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios.



TFG

Tabla 30. Informe de calibración para la masa "A" de 136 g.

 		HOJA DE DATOS E INFORME DE CALIBRACIÓN DE PESAS					
DATOS DEL EQUIPO:							
Denominación:	Weighing Balance			Nº identificación:			
Marca:	JADEVER	Modelo:	LPW-3015	Nº serie:			
Características:	F.E: 3000g						
Div. Escala:	0,2 g						
Método calibración:	Informe de calibración:						
DATOS DEL PATRÓN:							
Denominación:	JUEGOS DE MASA PATRÓN				Clase F2		
Marca:	---	Modelo:		Nº serie:			
Incertidumbre:	S/C			ko = 2			
Punto de calibración		1	2	3	4	5	6
Nominal	P	135,8	135,8	136,0	135,8	135,8	136,0
MEDIDAS OBTENIDAS	P ₀	136,4	136,4	136,4	136,2	136,4	136,4
$I_{\max} = (P_0 - P_1)_{\max}$		0,6	0,6	0,4	0,4	0,6	0,4
I patrón (Tm)		0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
I medida (Tm)		0,3464	0,3464	0,2310	0,2310	0,3464	0,2310
Condiciones ambientales:		Temperatura ambiente: 22,2 °C Humedad relativa: 45%.					
		Incertidumbre de calibración ± 0,7g				k= 2	
		Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión					
		Calibración de masa patrón de 136g (A) equilibradora. (100+20+10+5+1)					
		16 pesas de clase F2 o inferior de calidad según OIML R111					
Fecha: 21-05-2013							
Nombre y firma:		Visto bueno:					

[Calibración Masas]

Tabla 31. Informe de calibración para la masa "B" de 136 g.

  ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Universidad de Valladolid		HOJA DE DATOS E INFORME DE CALIBRACIÓN DE PESAS					
DATOS DEL EQUIPO:							
Denominación:	Weighing Balance				Nº identificación:		
Marca:	JADEVER	Modelo:	LPW-3015	Nº serie:			
Características:	F.E: 3000g						
Div. Escala:	0,2 g						
Método calibración:	Informe de calibración:						
DATOS DEL PATRÓN:							
Denominación:	JUEGOS DE MASA PATRÓN				Clase F2		
Marca:	---	Modelo:		Nº serie:			
Incertidumbre:	S/C				k ₀ = 2		
Punto de calibración	1	2	3	4	5	6	
Nominal	P	135,8	135,8	136,0	135,8	135,8	136,0
MEDIDAS OBTENIDAS	P ₀	136,6	136,6	136,6	136,6	136,6	136,6
$I_{\max} = (P_0 - P_1)_{\max}$		0,8	0,8	0,6	0,8	0,8	0,6
I patrón (Tm)		0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
I medida (Tm)		0,4619	0,4619	0,3464	0,4619	0,4619	0,3464
Condiciones ambientales: <i>Temperatura ambiente: 22,2 °C Humedad relativa: 45%.</i>							
Incertidumbre de calibración ± 0,92g				k= 2			
Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión Calibración de masa patrón de 136g (B) equilibradora. (100+20+10+5+1) 16 pesas de clase F2 o inferior de calidad según OIML R111							
Fecha: 21-05-2013							
Nombre y firma:				Visto bueno:			

[Calibración Masas]





ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Desarrollo de protocolo de calibración para equilibradoras horizontales de ejes y componentes ferroviarios.

TFG

Tabla 32. Informe de calibración para la masa de 680 g.

 		HOJA DE DATOS E INFORME DE CALIBRACIÓN DE PESAS					
DATOS DEL EQUIPO:							
Denominación:	Weighing Balance			Nº identificación:			
Marca:	JADEVER	Modelo:	LPW-3015	Nº serie:			
Características:	F.E: 3000g						
Div. Escala:	0,2 g						
Método calibración:	Informe de calibración:						
DATOS DEL PATRÓN:							
Denominación:	JUEGOS DE MASA PATRÓN				Clase F2		
Marca:	---	Modelo:		Nº serie:			
Incertidumbre:	S/C			ko = 2			
Punto de calibración		1	2	3	4	5	6
Nominal	P	680,2	680,2	680,0	680,2	680,2	680,0
MEDIDAS OBTENIDAS	P ₀	678,8	678,8	678,8	678,8	678,8	678,8
$I_{\max} = (P_0 - P_1)_{\max}$		1,4	1,4	1,2	1,4	1,4	1,2
I patrón (Tm)		0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
I medida (Tm)		0,8083	0,8083	0,6928	0,8083	0,8083	0,6928
Condiciones ambientales:		Temperatura ambiente: 22,2 °C Humedad relativa: 45%.					
		Incertidumbre de calibración ± 1,62g			k= 2		
		Observaciones: 0,1 % F.E. en la balanza de precisión					
		Calibración de masa patrón de 680g equilibradora. (500+100+500+20+10)					
		16 pesas de clase F2 o inferior de calidad según OIML R111					
Fecha: 21-05-2013							
Nombre y firma:		Visto bueno:					

[Calibración Masas]