

Efecto del Análisis Exploratorio de Datos en las conclusiones asociadas al Análisis de Varianza en la validación del sistema de medición de energía eléctrica del Instituto Dominicano para la Calidad (INDOCAL)

Joel Macea*

Instituto Dominicano para la Calidad (INDOCAL)

Calle Oloff Palme Esq. Av. Núñez de Cáceres, San Gerónimo, Santo Domingo, República Dominicana

Resumen

El análisis de varianza es una herramienta extraordinaria para el estudio de los sistemas de medición; incluso en algunos casos, según la rigurosidad de su aplicación, se utiliza de forma alternativa y/o complementaria para la estimación de la incertidumbre de las mediciones realizadas utilizando dicho sistema de medición [5]. Sin embargo, además de saber si se dispone de un sistema de medición "apropiado" en términos de la proporción de la variabilidad total respecto a los límites de aceptación del proceso, a veces se requiere información sobre la sensibilidad u optimización de la variable de salida, en cuyos casos el Análisis Exploratorio de Datos representa una alternativa no paramétrica bastante conveniente en términos de su simplicidad de aplicación y efectividad.

I. INTRODUCCIÓN

EN todas las infraestructuras de la calidad del mundo existen los laboratorios de ensayos y calibración; los primeros constituyen, esencialmente, la base de las decisiones en actividades de evaluación de la conformidad tales como la inspección y la certificación, los segundos son eslabones o referencias primarias en la cadena de trazabilidad metrológica. Indistintamente del tipo de laboratorio, eventualmente es necesario la validación del sistema de medición utilizado, ya sea con propósitos de aseguramiento de la calidad del mismo, acreditación u otro tipo de reconocimiento multilateral. El diseño y análisis de experimento aplicando Análisis de Varianza (ANOVA) es normalmente una de las herramientas empleadas para tales fines.

Este documento tiene la intención de ilustrar las ventajas y limitaciones de la aplicación aislada de la herramienta Análisis de Varianza en el experimento de validación del Laboratorio de Mediciones Eléctricas del INDOCAL. En tal sentido, se ha planificado, previo a la ejecución del experimento, un diseño factorial full, el cual por definición es ortogonal; este tipo de arreglo asegura que los efectos de cada factor no sean afectados por los otros. En algunos casos la motivación del uso de un diseño no ortogonal, se debe principalmente a restricciones naturales de

los recursos, sin embargo, es posible planificar un diseño reducido (fraccionario) que mantenga esta deseable propiedad de ortogonalidad, la que impedirá confundir el efecto de la variación de un factor sobre la variable de respuesta estudiada (mensurando) y propiciará la interpretación adecuada sobre la sensibilidad del mensurando respecto a los factores y la configuración más conveniente de los mismos [1]. Adicionalmente, esta deseable propiedad en el diseño habilita la capacidad de identificar la influencia conjunta de cada pareja, terna o n -tupla de factores según el interés y la necesidad del laboratorio.

II. EXPERIMENTO

A continuación se describen los factores, niveles, condiciones y metodología empleada en la validación del proceso de calibración de un medidor de energía eléctrica activa:

1. Como referencia del sistema de medida se utilizaron tres (3) patrones de energía ubicados en distantes áreas del laboratorio, los cuales por motivos de simplicidad serán referidos como: P_1 , P_2 y P_5 ;
2. Cuatro (4) técnicos del laboratorio realizaron las mediciones utilizando cada uno de los

*jmacea@indocal.gob.do

patrones descritos anteriormente, estos serán referidos como: *DS*, *OR*, *RM* y *YM*;

- La energía medida fue suministrada por una fuente de tensión y una fuente de intensidad de corriente independientes, con los niveles de estabilidad necesarios. Se simularon seis puntos de calibración referirse a la figura 1.

Punto de calibración	1	2	3	4	5	6
Tensión en V	120					
Intensidad en A	1	5	50	90	15	30
Factor de potencia	1			0.5 i		0.5 c
Frecuencia en Hz	60					

Table 1: Puntos de calibración simulados en la validación, cada uno de estos puntos se aplicó individualmente a las fases del medidor (R, S y T).

- El ítem calibrado fue un medidor de energía eléctrica activa estático, cuya exactitud comparado con la exactitud del patrón de medida permitió lograr una *relación de exactitud de prueba* de magnitud veinte (20)[3].

El medidor de energía eléctrica a calibrar posee una salida de pulsos la cual se acopla directamente con un contador de pulsos del patrón de energía. En este caso se tomó el error porcentual de medición directamente del patrón. Se tomaron cinco (5) errores (réplicas) y cada error es tomado al menos con dieciocho (18) impulsos, según se establece en el *Procedimiento de Calibración de Medidores de Energía Eléctrica (PR-TEC- 001)*¹. El medidor se calibró en tres (3) áreas por cada uno de los técnicos en la validación, esto responde a un diseño experimental completamente aleatorizado con réplicas [1].

En resumen, la data del experimento está constituida por doscientos ochenta y ocho (288) celdas de cinco (5) variables (técnico, patrón, fase, intensidad y factor de potencia), cada una con cinco (5) réplicas del error de medida, para un total de 1440 datos. Si se ordenase la data usando el orden estándar (Algoritmo de Yate) para el punto de calibración uno (1)—considerando los factores patrón y técnico con las demás variables fijas— se tendría una replicación oculta de $4 \cdot 3 \cdot 5 = 60$ observaciones[6]. Por motivos de evitar desviación de la intención señalada

¹www.indocal.gob.do

en la introducción de este trabajo y la extensión de la metodología aplicada, el estudio de varianza se realizará sólo al punto de calibración uno (1) especificado en la tabla 1; los errores de medida de este punto de calibración están adjuntos explícitamente en el anexo A. Sin embargo, en las figuras 7 y 9 se muestra visualmente toda la data, permitiendo comparar y establecer relaciones entre las distintas configuraciones y factores del experimento.

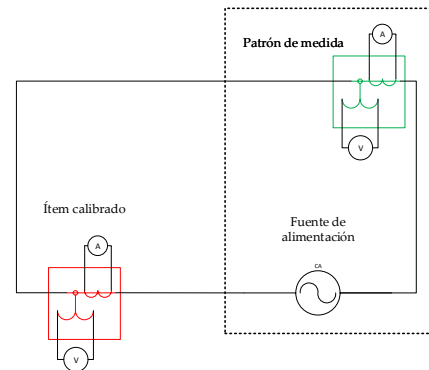


Figura 1: Representación esquemática del circuito del sistema de medición utilizado en la validación.

III. RESULTADOS

I. Análisis de varianza de dos factores

A continuación se presenta el código generador y los resultados del Análisis de varianza de dos factores del punto de calibración uno (1) en **R** [8] [2]:

```
require(SixSigma)
data11=data1labrep[data1labrep$Intensity
=="1"&data1labrep$Phase=="R",]
aovINDOCAL=ss.rr(Error,Patrón, Técnico,
lsl = -1, usl = 1, sigma = 5.15, data=
data11, main="Análisis de varianza de
dos vías")
aovTABLA=aovINDOCAL$anovaTable
EstudioVar=aovINDOCAL$studyVar[,2:3]
Tolerancia=aovINDOCAL$studyVar[,2]/0.02
```

La siguiente matriz permite apreciar la composición porcentual de la variación total en el sistema de medición debida a la aleatoriedad natural del sistema ("Total Gage R&R") y la variación debida al patrón de medida ("Part-To-Part"). En aplicaciones industriales normalmente esta última componente no forma parte de la variabilidad del sistema de medida, sin embargo, para el caso de la calibración de un ítem la situación es diferente.

```
as.data.frame(EstudioVar)

##           StudyVar %StudyVar
## Total Gage R&R  0.12296535   70.74
## Repeatability  0.03918741   22.54
## Reproducibility 0.11655396   67.05
## Técnico        0.00000000    0.00
## Patrón:Técnico 0.11655396   67.05
## Part-To-Part   0.12285746   70.68
## Total Variation 0.17382299  100.00
```

```
as.data.frame(aovINDOCAL$varComp)

##           VarComp %Contrib
## Total Gage R&R  0.0005701   50.04
## Repeatability  0.0000579    5.08
## Reproducibility 0.0005122   44.96
## Técnico        0.0000000    0.00
## Patrón:Técnico 0.0005122   44.96
## Part-To-Part   0.0005691   49.96
## Total Variation 0.0011392  100.00
```

Para la evaluación de la conformidad de los resultados, regularmente se utilizan criterios de escala de la relación $\frac{5.15 \sigma}{usl - isl}$, donde "sigma" es la raíz cuadrada positiva de la varianza del componente de variabilidad y el denominador es la diferencia de los límites de tolerancia (véase la notación usada del código en R anterior). De manera particular en este punto de calibración (fase R), dicha relación para cada componente, incluyendo la variación total del estudio R&R es inferior a 9%, de hecho, la variación total del proceso lo es, pues el aporte de de la variación de los técnicos es nulo; en este punto el resultado se podría interpretar, según las necesidades y el tipo particular de medición, como un sistema de medición "adecuado", sin embargo, este tipo de declaración está condicionada por la inter-

sección del intervalo de tolerancia y el intervalo que define $\frac{5.15 \sigma}{2}$ junto a la estimación del error de medida para cada punto de calibración. En el caso de estudio dicho intervalo es $(-0.18, 0.17)$ el cual está totalmente contenido en el intervalo de tolerancia, lo cual es una característica deseable a los fines de balancear los riesgos del consumidor y del productor al momento de tomar una decisión de conformidad[3].

```
as.data.frame(Tolerancia)

##           Tolerancia
## Total Gage R&R      6.148267
## Repeatability      1.959370
## Reproducibility    5.827698
## Técnico            0.000000
## Patrón:Técnico     5.827698
## Part-To-Part       6.142873
## Total Variation     8.691150
```

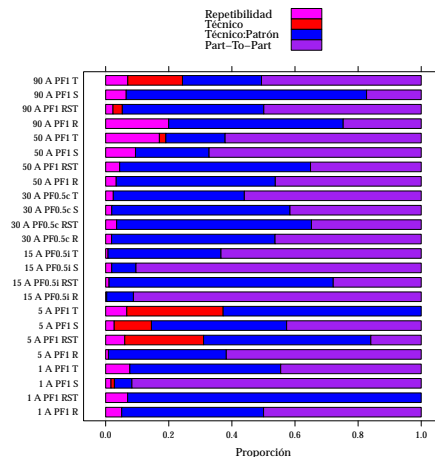


Figura 2: Gráfico de proporción de varianza asociada a cada componente de variabilidad en el estudio R&R, como subcomponente de la variabilidad general del sistema de medición.

De forma complementaria, la figura 2 presenta gráficamente la contribución de cada componente de varianza para los veinticuatro (24) puntos de calibración definidos en la tabla 1 para cada fase.²

²Para los propósitos de este trabajo la combinación RST se trata como una fase adicional, es decir, como otro nivel de la variable fase.

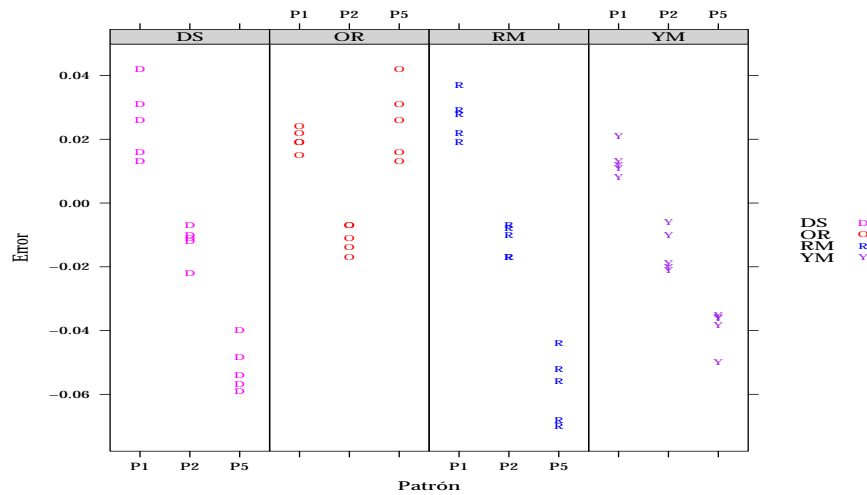


Figura 3: Gráfico de interacción de los factores técnico y patrón en las condiciones del punto de calibración uno (1) aplicado a la fase R del ítem bajo calibración.

La figura 3 muestra la interacción de los dos factores bajo estudio (técnico y patrón), donde se puede apreciar la homogeneidad del efecto decreciente del error debido a la variación $P1-P2-P5$ excepto para el técnico "OR". Similarmente la figura 11 muestra la misma información para cada una de las fases y con el factor técnico agrupado por panel [9].

Finalmente, se presenta el análisis proporcionado por **R** con las herramientas de la instalación base. Todas las variables vistas anteriormente se pueden conseguir a partir de la suma de cuadrados ("SumSq") y sus respectivos grados de libertad ("Df") en el bloque a continuación [7]. Adicionalmente, están disponibles el estadístico- F y el correspondiente valor- p para la hipótesis nula de que las medias de los niveles de los factores son iguales. Se puede apreciar que existe diferencia significativa en el caso de las medias muestrales de los seis (6), cuatro (4) y tres (3) niveles definidos por la interacción de los factores Técnico:Patrón, el factor Técnico y el factor Patrón respectivamente.

##	Propiedad	Df	SumSq
##	Técnico	3	0.0070516
##	Patrón	2	0.0280008
##	Patrón:Técnico	6	0.0157142
##	Repetibilidad	48	0.0027802
##	MeanSq	Fvalue	Pr
##	0.0023505	40.58146	3.274656e-13
##	0.0140004	241.71372	8.692288e-26
##	0.0026190	45.21693	4.221769e-18
##	0.0000579	NA	NA

Hasta el momento sólo se ha procedido realizando un análisis básicamente cuantitativo de los datos de validación utilizando criterios de conformidad numéricos. En el bloque anterior, por ejemplo, el valor- p del estadístico- F sugiere que existe una interacción estadísticamente significativa entre los factores estudiados, sin embargo, hasta el momento se desconoce la causa de la misma y la técnica ANOVA, por sí sola, no garantiza su identificación de manera efectiva. Lo anterior nos lleva a considerar un enfoque/filosofía que nos permitirá lograr una mayor penetración en el análisis de los resultados estudiados permitiendo que los datos hablen por sí mismos opuesto a modelarlos a priori con alguna distribución de probabilidad, este enfoque se conoce como *Análisis Exploratorio de Datos*.

II. Análisis Exploratorio de Datos

El enfoque de *Análisis Exploratorio de Datos* es una ideología (no una técnica estadística) sobre la actitud que se debe asumir de cara a describir o modelar una población caracterizada por un subconjunto de datos tomados de forma aleatoria de la misma [7]. En muchos casos realizar el estudio de toda la información es impráctico y costoso, este enfoque permite hacer converger los esfuerzos a variables o factores específicos con características singulares en los datos y de interés para el experimentador.

A partir de la figura 5 hasta la figura 10 se presentan varios gráficos de efecto y dispersión de los datos[4], los cuales permitirán escudriñar los datos e interpretar la causa de los resultados numéricos obtenidos anteriormente.

En la interpretación y relación de estos gráficos se debe considerar la siguiente tabla de equivalencia en la notación:

Patrón			Técnico			
P1	P2	P5	DS	OR	RM	YM
1	2	3	1	2	3	4

Los puntos rojos en el eje horizontal de cada panel tienen dos interpretaciones distintas:

1. En el caso de las figuras de efecto de los factores en el error de medida 5 y 6, indican que en la prueba- F para el factor particular se rechaza la hipótesis nula de igualdad de las medias de los niveles del mismo (ANOVA con un factor);
2. En el caso de las figuras de dispersión 7 a 10 indican que en la prueba- F para un nivel del factor particular condicionado al otro factor se rechaza la hipótesis nula de igualdad de las medias de los niveles del mismo (ANOVA con un factor).

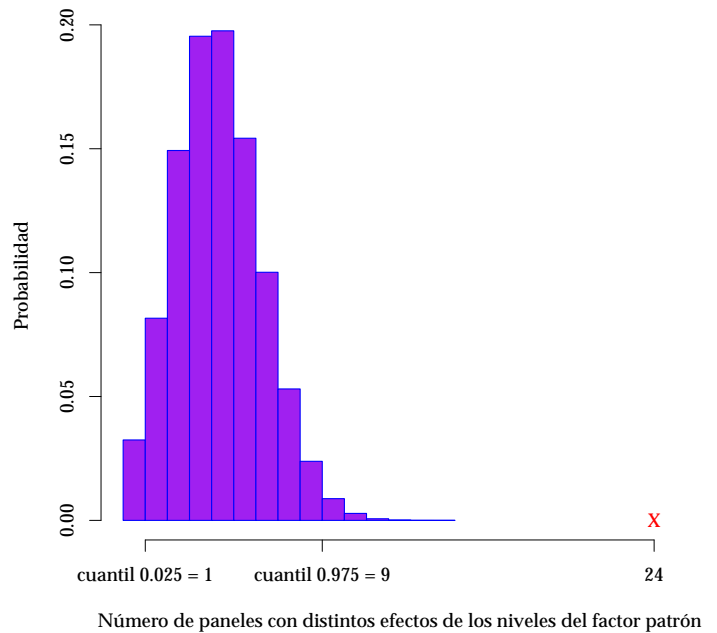


Figura 4: Función de masa de probabilidad de una variable binomial con parámetros $n=24$ y $p=0.20$ modelando la probabilidad de obtener un número particular de paneles en los cuales se rechaza la hipótesis nula para el factor "Patrón".

IV. CONCLUSIONES

1. Desde el punto de vista del estudio estudio R&R y la evaluación del mismo, la variabilidad del sistema de medición del laboratorio en el caso presentado (punto de calibración uno -1- fase R) al igual que en el resto de las demás veintitres (23) condiciones de calibración fue "preciso" [2], por otro lado, cuando se examina el bloque de ANOVA y el estadístico- F , se tiene que el efecto de los factores Patrón:Técnico, Técnico y Patrón es no nulo; en otras palabras, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias muestrales de los niveles de dichos factores.
2. Las componentes con mayor peso específico en la variabilidad total del sistema son las asociadas a la interacción Patrón:Técnico y al factor Patrón.

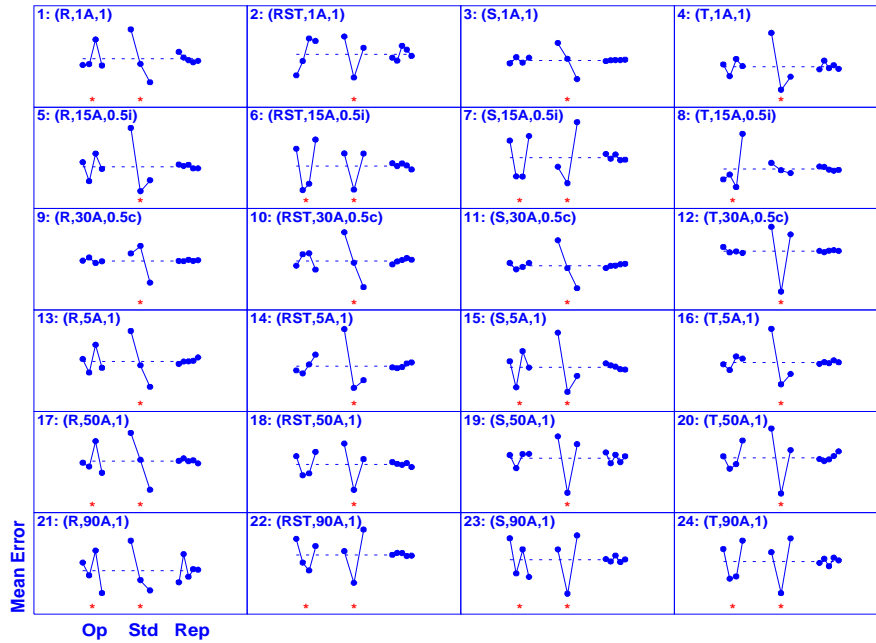


Figura 5: Gráfico de efectos principales de los factores "Técnico" (Op), "Patrón (Std)" y "Réplica" (Rp) en el error de medida. Eje vertical (Error promedio). Eje horizontal (Factores). Límites flotantes.

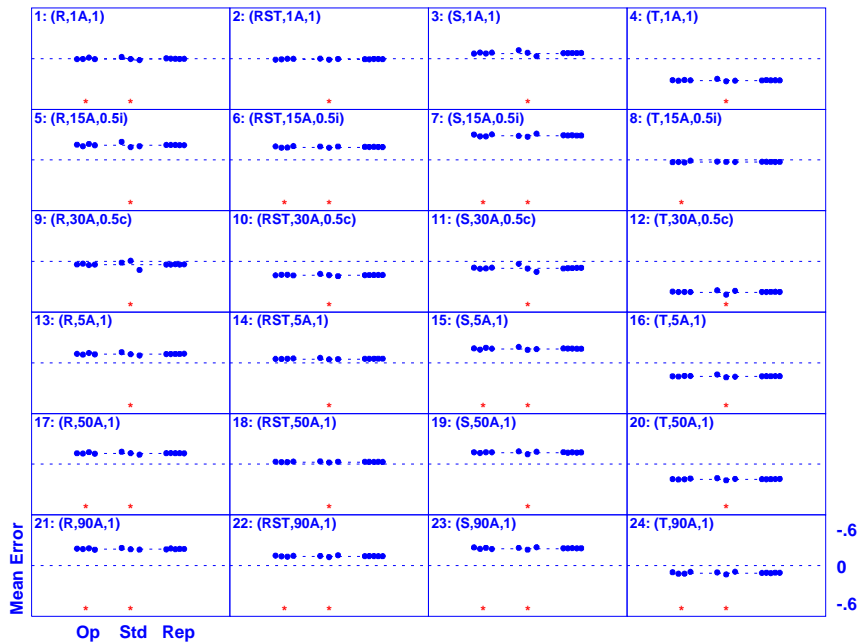


Figura 6: Gráfico de efectos principales de los factores "Técnico" (Op), "Patrón (Std)" y "Réplica" (Rp) en el error de medida. Eje vertical (Error promedio). Eje horizontal (Factores). Límites comunes.

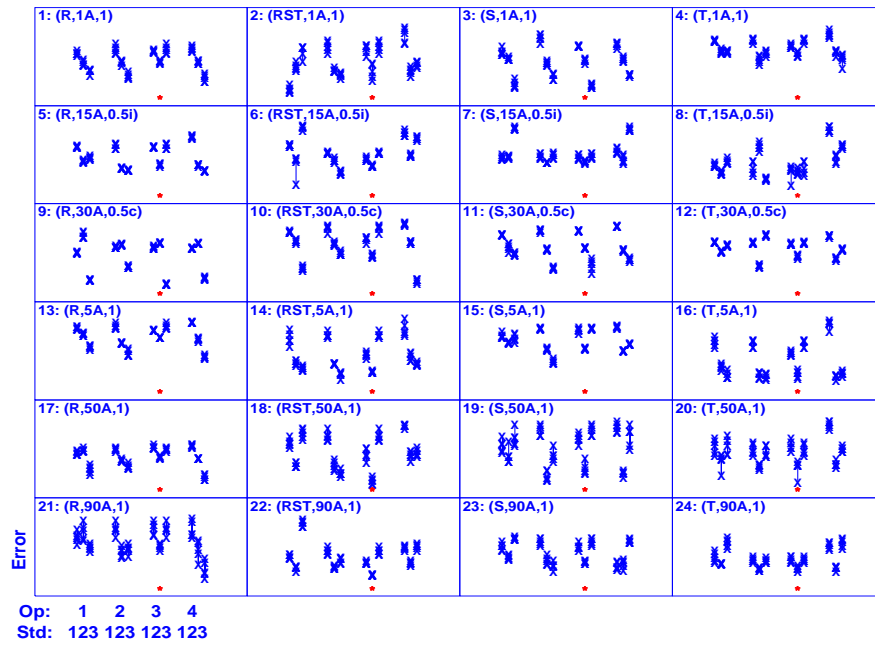


Figura 7: Gráfico de dispersión conjunto del factor "Patrón (Std)" condicionado al factor "Técnico" (Op). Eje vertical (Error). Eje horizontal (Factores). Límites flotantes.

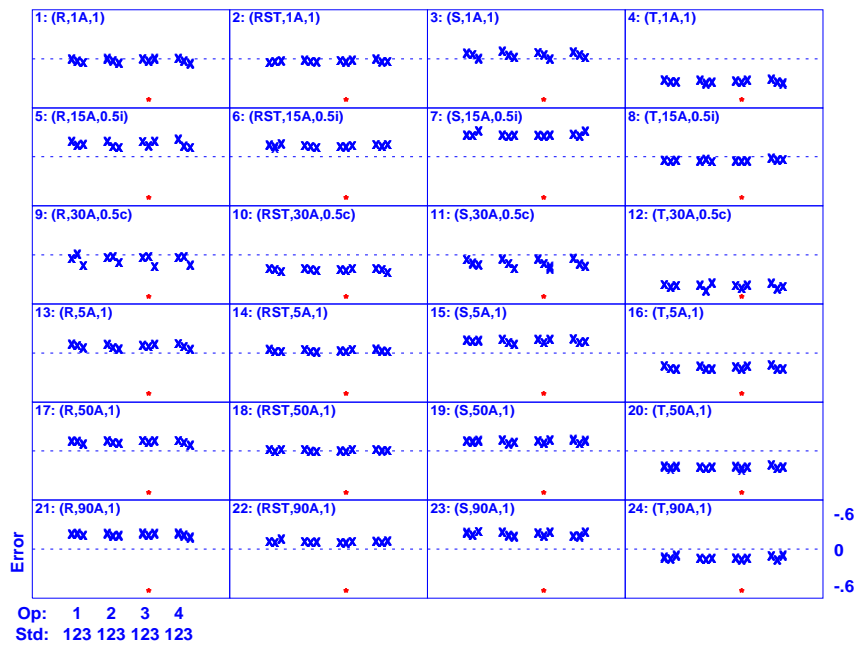


Figura 8: Gráfico de dispersión conjunto del factor "Patrón (Std)" condicionado al factor "Técnico" (Op). Eje vertical (Error). Eje horizontal (Factores). Límites comunes.

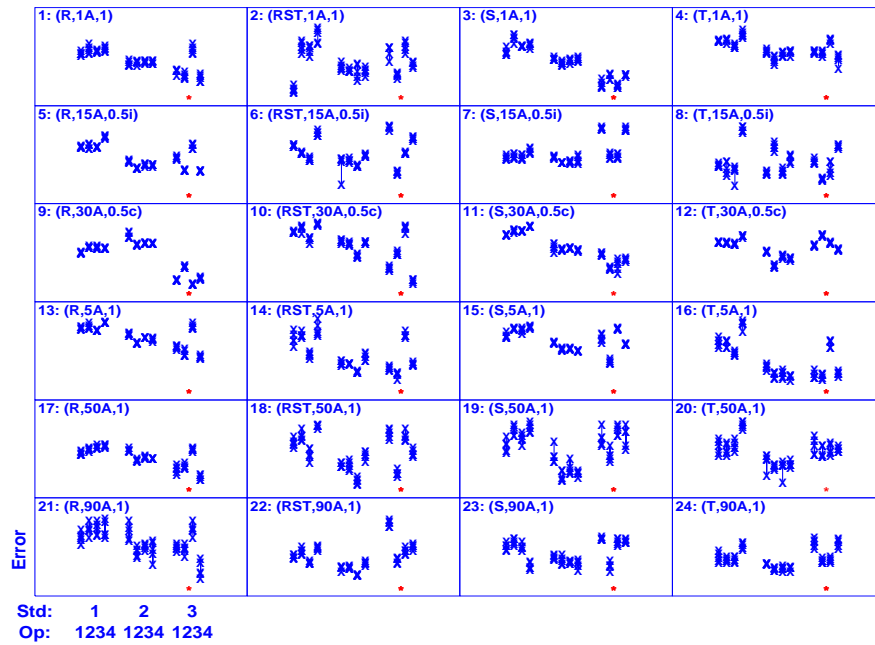


Figura 9: Gráfico de dispersión conjunto del factor "Técnico" (Op) condicionado al factor "Patrón (Std)". Eje vertical (Error). Eje horizontal (Factores). Límites flotantes.

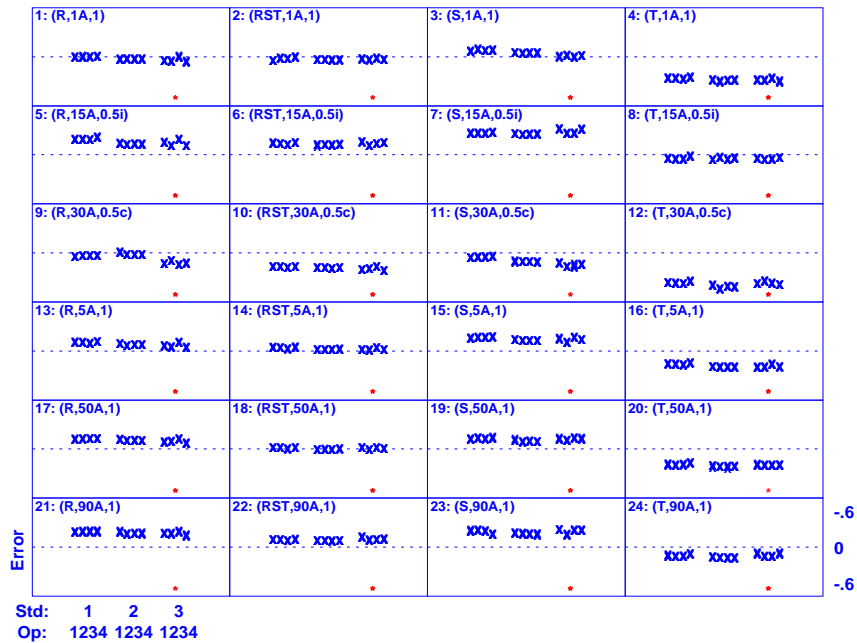


Figura 10: Gráfico de dispersión conjunto del factor "Técnico" (Op) condicionado al factor "Patrón (Std)". Eje vertical (Error). Eje horizontal (Factores). Límites comunes.

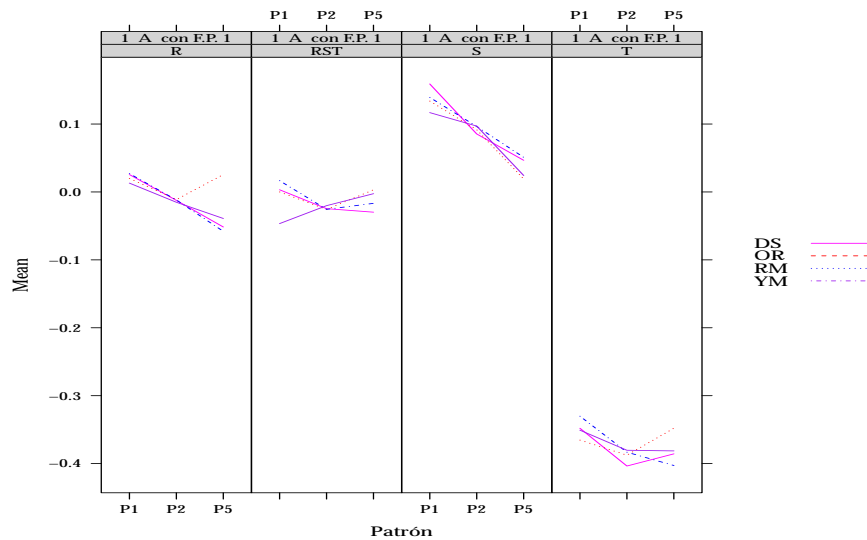


Figura 11: Gráfico de dispersión de las medias de los errores condicionado a las configuraciones del punto de calibración uno (1) de la tabla 1 y agrupado por técnico.

- El efecto de los tres (3) niveles del factor "Patrón" es "distinto" en los veinticuatro (24) puntos de calibración según lo ilustrado en la figura 5, lo cual evidentemente es una frecuencia extrema como se puede visualizar en la figura 4.

Es relevante resaltar que este número de paneles en los cuales se rechaza la hipótesis nula para el factor "Patrón" es extremo incluso para valores poco razonables del parámetro de probabilidad p , por ejemplo $p = 0.50$.

- El efecto de los cuatro (4) niveles del factor "Técnico" es "distinto" en diez (10) de los veinticuatro (24) puntos de calibración según lo ilustrado en la figura 5;
- El efecto de las cinco (5) réplicas no es "distinto" en los veinticuatro (24) puntos de calibración según lo ilustrado en la figura 5, es decir, el cambio en el error de medida debido a las réplicas es estadísticamente no significativo;
- El efecto del factor "Patrón" en el error de medida condicionado al factor "Técnico" es no robusto en los veinticuatro (24) puntos de calibración debido al "Técnico" 3(OR) y su interac-

ción con el "Patrón" 3(P5) según lo ilustrado en la figura 7;

- El efecto del factor "Técnico" en el error de medida condicionado al factor "Patrón" es no robusto en los veinticuatro (24) puntos de calibración debido al "Patrón" 3(P5) y su interacción con el "Técnico" 3(OR) según lo ilustrado en la figura 9;
- Se logró identificar los siguientes resultados resagados y/o atípicos en los paneles 6 (Técnico = 1, Patrón = 2), 8 (3,1), 19 [(1,2), (1,3), (2,3), (4,3)] y 20 [(1,2), (3,2)] de las figuras 7 y 9.
- A partir de la figura 12 se puede notar que la mayor dispersión de los errores de medida ocurre para el Técnico "OM" con el Patrón "P5" (véanse conclusiones 5 y 6). En el caso de las intensidades esto sucede para el Técnico "OM" con una intensidad de 30 A. Se podría hacer un juicio similar para los demás niveles del factor Técnico. Para los tres (3) primeros niveles de corriente, tomando como base el primer nivel, el efecto en el error de medida es equivalente.

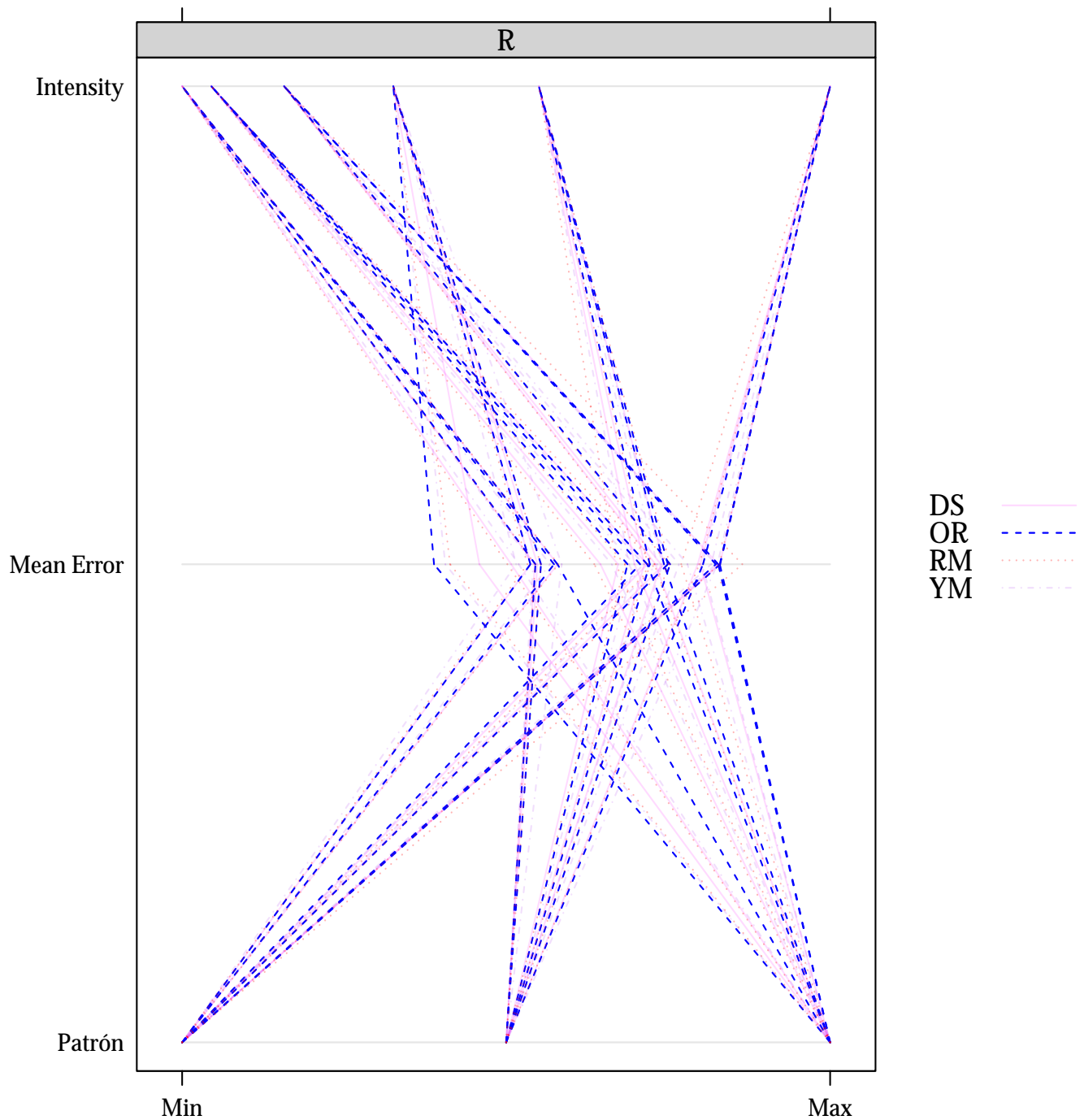


Figura 12: Gráfico de ejes paralelos mostrando la relación de crecimiento del error de medida para los distintos valores intensidad de corriente (1, 5, 15, 30, 50, 90), patrón (P1, P2, P5) en este mismo orden para el técnico OR (en el fondo se muestran los demás técnicos para fines de contexto). El gráfico muestra el comportamiento del ítem calibrado en la fase R.

REFERENCES

- [1] G. E. P. Box, J. S. Hunter, and W. G. Hunter. *Statistics for Experiments*. Wiley, 2005.
- [2] E. L. Cano, J. M. Moguerza, and A. Redchuk. *Six Sigma with R, Statistical Engineering for Process Improvement*. 2012.
- [3] Joint Committee for Guides in Metrology. *Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment* —. JCGM 106, 2012.
- [4] N. A. Heckert and J. J. Filliben. *Dataplot*. <http://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/>, 2013.
- [5] T. Lafarge and A. Possolo. *The NIST Uncertainty Machine*. 2015.
- [6] J. Lawson. *Design and Analysis of Experiments with SAS*. Chapman, 2010.
- [7] NIST/SEMATECH. *e-Handbook of Statistical Methods*. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2013.
- [8] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.
- [9] Deepayan Sarkar. *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer, New York, 2008. ISBN 978-0-387-75968-5.

ANEXOS

A. SUBCONJUNTO DE LOS DATOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL FULL
CORRESPONDIENTE AL PUNTO DE CALIBRACIÓN UNO (1)

##	Técnico	Patrón	Phase	Intensity	FP	Error
## 7	YM	P1	R	1	1	0.0210
## 31	YM	P2	R	1	1	-0.0190
## 55	YM	P5	R	1	1	-0.0382
## 79	DS	P1	R	1	1	0.0420
## 103	DS	P2	R	1	1	-0.0070
## 127	DS	P5	R	1	1	-0.0398
## 151	OR	P1	R	1	1	0.0240
## 175	OR	P2	R	1	1	-0.0110
## 199	OR	P5	R	1	1	0.0420
## 223	RM	P1	R	1	1	0.0290
## 247	RM	P2	R	1	1	-0.0080
## 271	RM	P5	R	1	1	-0.0440
## 295	YM	P1	R	1	1	0.0110
## 319	YM	P2	R	1	1	-0.0200
## 343	YM	P5	R	1	1	-0.0353
## 367	DS	P1	R	1	1	0.0310
## 391	DS	P2	R	1	1	-0.0110
## 415	DS	P5	R	1	1	-0.0541
## 439	OR	P1	R	1	1	0.0220
## 463	OR	P2	R	1	1	-0.0140
## 487	OR	P5	R	1	1	0.0310
## 511	RM	P1	R	1	1	0.0220
## 535	RM	P2	R	1	1	-0.0070
## 559	RM	P5	R	1	1	-0.0520
## 583	YM	P1	R	1	1	0.0120
## 607	YM	P2	R	1	1	-0.0210
## 631	YM	P5	R	1	1	-0.0358
## 655	DS	P1	R	1	1	0.0260
## 679	DS	P2	R	1	1	-0.0100
## 703	DS	P5	R	1	1	-0.0485
## 727	OR	P1	R	1	1	0.0150
## 751	OR	P2	R	1	1	-0.0170
## 775	OR	P5	R	1	1	0.0260
## 799	RM	P1	R	1	1	0.0190
## 823	RM	P2	R	1	1	-0.0170
## 847	RM	P5	R	1	1	-0.0560
## 871	YM	P1	R	1	1	0.0130
## 895	YM	P2	R	1	1	-0.0060
## 919	YM	P5	R	1	1	-0.0498
## 943	DS	P1	R	1	1	0.0130
## 967	DS	P2	R	1	1	-0.0120

## 991	DS	P5	R	1	1	-0.0567
## 1015	OR	P1	R	1	1	0.0190
## 1039	OR	P2	R	1	1	-0.0070
## 1063	OR	P5	R	1	1	0.0130
## 1087	RM	P1	R	1	1	0.0280
## 1111	RM	P2	R	1	1	-0.0170
## 1135	RM	P5	R	1	1	-0.0700
## 1159	YM	P1	R	1	1	0.0080
## 1183	YM	P2	R	1	1	-0.0100
## 1207	YM	P5	R	1	1	-0.0362
## 1231	DS	P1	R	1	1	0.0160
## 1255	DS	P2	R	1	1	-0.0220
## 1279	DS	P5	R	1	1	-0.0589
## 1303	OR	P1	R	1	1	0.0190
## 1327	OR	P2	R	1	1	-0.0070
## 1351	OR	P5	R	1	1	0.0160
## 1375	RM	P1	R	1	1	0.0370
## 1399	RM	P2	R	1	1	-0.0100
## 1423	RM	P5	R	1	1	-0.0680