

# Impacto de la Metrología en los Procesos de la Industria de Semiconductores

Julio César López,<sup>a</sup> Carmen Marina Trejo Morales,<sup>b</sup> Salvador Echeverría Villagómez,<sup>b</sup> Enrique Villa<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Skyworks Solutions de México, S. A. de C. V.  
Calzada Gómez Morín 1690, 21259, Baja California, México.  
juliocesar.lopez@skyworksinc.com

<sup>b</sup> Centro Nacional de Metrología  
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.

<sup>c</sup> Centro de Investigación en Matemáticas, A. C.  
Jalisco S/N, Valenciana, 36240, Guanajuato, México.

## RESUMEN

Se presenta el trabajo llevado a cabo en una empresa fabricante de micro-circuitos para teléfonos celulares, en el cual se aplicó la metrología para el aseguramiento de los sistemas de medición y ahora se están utilizando estos para la optimización de los procesos productivos. En cuanto al aseguramiento metrológico se trabajó con la metodología MESURA en variables electromagnéticas y en cuanto a la optimización de los procesos se están implementando métodos de control estadístico de procesos. Dado que cada componente que se fabrica en la planta tiene múltiples características de calidad, y que la optimización de una de ellas puede influir o influye en el desempeño de las otras, se está en la fase de implementar un control estadístico de procesos multivariado. El artículo presenta los avances del proyecto en general, el estado actual del mismo y plantea el trabajo a futuro.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aseguramiento de las mediciones y confiabilidad de éstas tiene en la actualidad un rol importante en el desempeño de los productos. Por esto el sector industrial, y principalmente el de semiconductores, ha puesto especial cuidado en establecer o desarrollar sistemas que aseguren que estos cumplan y garanticen sus resultados y la evaluación de conformidad del producto. Además es preciso lograr que los sistemas de medición se conviertan en un factor de mejora de los procesos y no en un elemento que obstaculice el mismo.

Con este antecedente, se ha tomado la iniciativa por parte de la compañía para desarrollar un sistema robusto de metrología que permita conocer, medir, monitorear y controlar el impacto y la relación que existe entre los sistemas de medición, la variación de proceso y su impacto en la calidad.

El modelo tiene como parte medular el desarrollo de un Sistema de Aseguramiento Metrológico y el Control Estadístico de Procesos, los cuales son aplicados como proyecto prototipo en el sistema de medición *Diode test platform* usado para determinar características eléctricas del producto y con ello su conformidad respecto a sus especificaciones.

## 2. ASEGURAMIENTO METROLÓGICO

La mayoría de metodologías de optimización, como 6-Sigma, Ciclo PDCA, etc., tienen en sus primeras etapas una de medición. En ella es preciso reducir al mínimo la variabilidad atribuible a la medición, esto es, la incertidumbre.

Para lograr esto, en la empresa se trabajó con la asesoría del CENAM y se siguieron las etapas del programa MESURA, con las siguientes fases:

- Identificación de tabla de variables críticas y levantamiento de recursos metrológicos.
- Análisis y diagnóstico sobre cada una de las variables.
- Diseño de sistema óptimo y programa de acciones.
- Implantación de los sistemas diseñados.
- Desarrollo de los modelos de incertidumbre asociada a los procesos de calibración del equipo.

### 2.1. Desarrollo del Sistema Metrológico

El desarrollo de los sistemas metrológicos en Skyworks se realizaron a partir de la Etapa I de MESURA en junio 2006. Lo descrito en esta sección corresponde a los resultados ahí logrados y en las etapas subsiguientes, b y c.

- a) Identificación de la tabla de variables críticas y levantamiento de recursos metroológicos.
- En la primera etapa se determinaron las necesidades metroológicas en el proceso de producción y en el área de pruebas finales, definiendo la incertidumbre de medición requerida en cada variable. Los resultados fueron [1]:
- Procesos productivos: 7 procesos, 12 variables críticas, 44 combinaciones magnitud-intervalo-tolerancia.
  - Procesos de prueba: 9 plataformas, 8 variables, 108 combinaciones magnitud-intervalo-tolerancia.

Tabla 1. Variables críticas.

Variable (magnitud, parámetro, propiedad)	Tipo (crítica, control, monitoreo)	Alcance	Incertidumbre requerida
Parámetros de dispersión del analizador 8753E	Control	Módulo: 0 a 1, Fase: -180° a +180°	±0,015, ±180°
Pérdidas por inserción de los switch de RF	Control	0,5 dB	±0,1 dB
Tensión de c.c. de salida de la fuente 6626A	Crítica	0 V a 50 V	±(50 mV +0,06% de la tensión de salida)
Ganancia del amplificador de 5 W, 800 MHz-4.2 GHz	Crítica	0 a 30 dB	±1 dB
Impedancia del Kit de calibración OSL	Crítica	50 ohms, 0 ohms, infinito ohms	±1,5%
Potencia del medidor Agilent E4418B	Crítica	-70 dBm a +44 dBm	±0,2 dB
Factor de calibración del sensor E9304A	Crítica	0,8 W/W a 1 W/W (80% a 100%)	±0,03 W/W
Potencia del medidor URV5	Crítica	-70 dBm a +44 dBm	±0,2 dB
Factor de calibración del sensor NRV-Z5	Crítica	0,8 W/W a 1 W/W (80% a 100%)	±0,03 W/W
Capacitancia, Medidor C-V 4279A	Crítica	0,00001 pF a 1280 pF	±0,1 %
Tensión en c.c. Multímetro Keithley 2400	Crítica	0 V a 200 V	±0,012 %
Tensión en c.c. Multímetro Keithley 2400	Crítica	0 V a 200 V	±0,012 %
Resistencia, Medidor LCR 4286A	Crítica	200 mΩ a 3 kΩ	±1 %

Con este análisis se encontraron los elementos suficientes para determinar que podrían desarrollarse procesos de calibración internos para instrumentos de medición de magnitudes eléctricas, lo que permitiría a la empresa, en primera instancia, disminuir la dependencia de servicios de calibración de laboratorios externos y, sobre todo, le permitiría tener una referencia interna, siempre disponible para evaluar sus sistemas de medición.

- b) Análisis y diagnóstico de las variables.
- Posteriormente los asesores especialistas en electromagnetismo realizaron un análisis y diagnóstico sobre cada magnitud. Por ejemplo, para el caso de la medición de Capacitancia, anteriormente los Medidores de Capacitancia-

Tensión (MCT) eran calibrados por un laboratorio externo. Aunque en el informe de calibración el proveedor indicaba que la trazabilidad era hacia los patrones de medición del NIST, no proporcionaba valores de incertidumbre de medición, componente indispensable de la trazabilidad. Se realizó además un análisis de las tolerancias permitidas por las especificaciones de las pruebas de capacitancia a diodos comparando estos datos con la especificación del fabricante del MCT. En esta etapa se detectaron áreas de oportunidad que fueron abordados por los responsables en la empresa. El proveedor de calibración externo realiza solo una medición en las diferentes magnitudes del medidor de capacitancia (1 pF, 10 pF, 100 pF y 1 nF), lo cual no permite obtener información suficiente para evaluar los errores por repetibilidad. La propuesta es que el laboratorio de Skyworks realice tres mediciones por cada magnitud y utilice otro factor de variación, como lo es la compensación de cables por temperatura y obtener con ello una mejor aproximación del error de repetibilidad para integrarlo a un modelo de incertidumbre.

c) Diseño de los sistemas adecuados.

Con base en el diagnóstico se sugirió la adquisición de un conjunto de capacitores patrón con valores nominales adecuados para el uso predeterminado, así como la adquisición de adaptadores y conectores coaxiales. Se planteó además la cadena de trazabilidad óptima. La carta de trazabilidad sugerida mostró la forma en la que Skyworks podría lograr trazabilidad de las mediciones realizadas en la línea de prueba de dispositivos con los medidores de Capacitancia-Tensión (MCT) al Sistema Internacional de Unidades (SI). La calibración de los MCT se logrará por medio de un conjunto de capacitores patrón calibrados con valores nominales de 1 pF, 10 pF, 100 pF y 1 nF, empleando el método de medición directa. La calibración de los MCT se llevará a cabo dentro del laboratorio de Skyworks.

d) Implantación de los sistemas diseñados.

A partir de las etapas previas se inició la fase de implantación de las acciones recomendadas para asegurar, a través de un nuevo esquema de calibraciones, la confiabilidad de los sistemas de medición.

La implantación de los sistemas de calibración se dividió en dos etapas principalmente:

1. Calibración de los sistemas de medición para intensidad de corriente y tensión eléctrica DC.

2. Calibración se los sistemas de medición de radiofrecuencia y microondas.

La primera parte ya se encuentra cien por ciento implantada de acuerdo a lo planeado, mientras que la segunda está aún en proceso de implantación. Las fases que se plantearon para lograr la implementación fueron:

- Selección y contratación del personal requerido para las funciones de calibración dentro del laboratorio de calibración Skyworks.
- Selección y planeación de compra de equipo patrón según recomendaciones y requisitos metrológicos definidos en la fase II del programa MESURA.
- Entrenamiento técnico del personal asignado al laboratorio, por expertos del CENAM; los entrenamientos fueron alineados a los requisitos específicos de medición de nuestros productos.

Los entrenamientos y asesoría técnica provista por parte de CENAM al personal, tuvo como objetivo principal desarrollar y asegurar la competencia y capacidad técnica del mismo. Con ello se logró trabajar en el diseño e implantación de los procedimientos de calibración, modelos de incertidumbre, cartas de trazabilidad y gráficos de control para monitorear el desempeño de los sistemas de medición a través del tiempo, para crear en la planta capacidades propias de calibración y aseguramiento metrológico.

Esto permitió pasar de un sistema enfocado solo a cumplir un requisito normativo de calibración, a un sistema orientado al aseguramiento de la calidad de las mediciones. Con el cambio se llegó a un sistema *in house* de auto calibración, donde el personal es competente en la calibración del equipo y, aunado a ello, es capaz de analizar y transformar el conocimiento que se genera para dar un valor agregado que contribuya a la mejora tanto de nuestros sistemas de medición como de nuestro producto.

La implantación del laboratorio Skyworks ha generado hasta el momento un ahorro aproximado de 80 000 USD anuales por concepto de calibraciones; el gasto anual se redujo de 165 000 USD a 85 000 USD, nuestra meta final es alcanzar un gasto anual no mayor a los 45 000 USD.

La estructura organizacional antes de implementar el modelo de aseguramiento metrológico estaba constituida por el supervisor del área y el Ingeniero de calibraciones. Después de implementar el sistema metrológico obtenido en coordinación con el programa MESURA, la estructura quedo conformada por: el supervisor del área, ingeniero de calibraciones, especialista en corriente directa (CD), especialista en radiofrecuencia (RF) y asistente administrativo.

e) Desarrollo de los modelos de incertidumbre asociada a la calibración del equipo.

Los modelos de incertidumbre fueron planteados tomando como base la guía para estimar incertidumbre en la medición [2] por CENAM. Para cada método de calibración se identificaron y estimaron las diversas fuentes de variación que influyen en el resultado de la medición. Las Figs. 1 a 4 muestran parte del desarrollo y los resultados obtenidos para el proceso de calibración de un medidor de capacitancia.

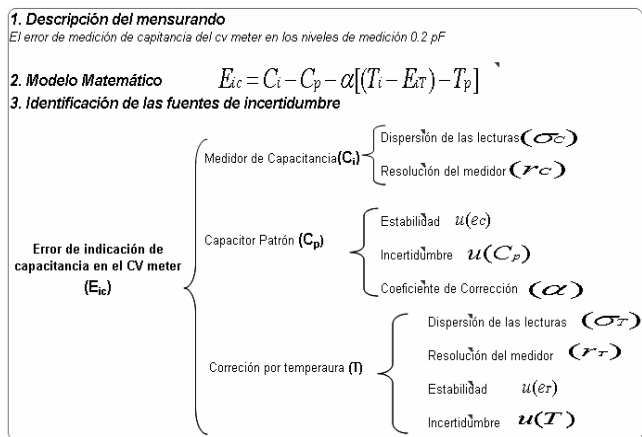


Fig. 1. Pasos 2 y 3: Modelo matemático y fuentes de incertidumbre.

Como se puede observar en el desarrollo de este modelo, la componente de incertidumbre nos acerca con mayor exactitud y confiabilidad al valor esperado de la medición. Dicha variación podría o no ser significativa a la decisión de conformidad del producto, por lo cual se vuelve un factor importante que debe ser evaluado.

**4. Ecuaciones de incertidumbre**

Ecuación de incertidumbre

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial E_i}{\partial C_i} u(\sigma_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial C_i} u(r_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial C_p} u(e_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial C_p} u(C_p)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial C_p} u(\alpha)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial T} u(\sigma_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial T} u(r_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial T} u(e_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial T} u(T)\right)^2}$$

Ecuación para los grados de libertad      Coeficientes de sensibilidad

$$v_c = \frac{u(y)^4}{\sum \frac{u(x)^4}{v}}$$

$\left(\frac{\partial E_i}{\partial C_i} = 1\right)$

$\left(\frac{\partial E_i}{\partial C_p} = -1\right)$

$\left(\frac{\partial E_i}{\partial \alpha} = -T_m + e_m + T_s\right)$

$\left(\frac{\partial E_i}{\partial T_m} = -\alpha\right)$

$\left(\frac{\partial E_i}{\partial T_s} = \alpha\right)$

Fig. 2. Paso 4: Ecuaciones de incertidumbre.

**5. Tabla de estimación de incertidumbre**

Equipo	Fuentes de Incertidumbre	V.E. [UM]	F.P.	u(z) [UM]	C.S [S.U.]	u(y) = {u(z) * C.S.} [UM]	[V]	
Medidor de Capacitancia	Dispersión de las lecturas $u(\sigma_c)$	0.1895395 pF	Normal	0.001604 pF	$\frac{\partial E_i}{\partial C_i}$	1 pF	0.001604 pF/pF	9
	Resolución del medidor $u(r_c)$		Cuadrada	0.000003 pF	$\frac{\partial E_i}{\partial C_i}$	1 pF	0.000003 pF/pF	10000
Equipo Patrón	Estabilidad del equipo patrón $u(e_c)$	0.199819 pF	Cuadrada	0.000577 pF	$\frac{\partial E_i}{\partial C_p}$	-1 pF	-0.000577 pF/pF	60
	Incertidumbre del equipo patrón $u(C_p)$		Normal	0.000045 pF	$\frac{\partial E_i}{\partial C_p}$	-1 pF	-0.000045 pF/pF	60
	Coefficiente de corrección $u(\alpha)$	0.00004 pF/°C	Cuadrada	0.000001 pF/°C	$\frac{\partial E_i}{\partial \alpha}$	0.1 °C	0.000000 pF/pF	60
Medidor de temperatura	Dispersión de las lecturas $u(\sigma_r)$	23 °C	Normal	0.000000 °C	$\frac{\partial E_i}{\partial T}$	-0 pF/°C	0.000000 pF/pF	1
	Resolución del medidor $u(r_r)$		Cuadrada	0.028868 °C		-0 pF/°C	-0.000001 pF/pF	10000
	Estabilidad del medidor de temperatura $u(e_r)$	0.44 °C	Cuadrada	0.288675 °C	$\frac{\partial E_i}{\partial T}$	0 pF/°C	0.000012 pF/pF	60
	Incertidumbre del equipo de medición de temp. $u(T)$		Normal	0.250000 °C	$\frac{\partial E_i}{\partial T}$	0 pF/°C	0.000010 pF/pF	60
Error de indicación de la medición de capacitancia		-0.010274 pF			$u_{(c)}$	0.00170521 pF	11.47	

Fig. 3. Paso 5: Presupuesto de incertidumbre y cálculo.

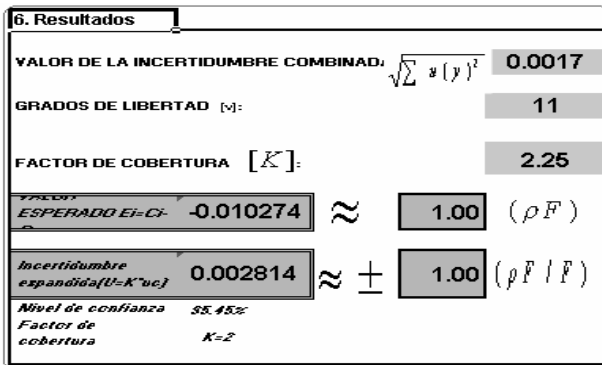


Fig. 4. Paso 6: Resultados del error de medición de capacitancia en 10 pF y la incertidumbre estimada.

En la Fig. 5, se representa el resultado y efecto de la calibración e incertidumbre de la misma, estimados en el sistema de medición de capacitancia. De acuerdo a estos datos es posible observar como en las lecturas iniciales se presenta un corrimiento con respecto al valor nominal del producto, que se minimiza una vez que el error es compensado, como se muestra en la misma gráfica.

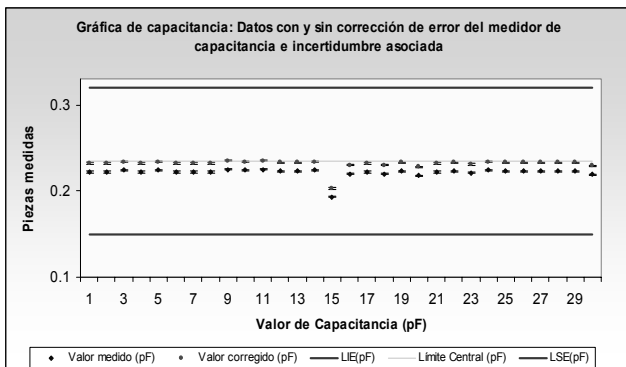


Fig. 5. Gráfica a medición a capacitancia con incertidumbre asociada y error a medición.

La incertidumbre estimada para este caso particular es poco significativa, por lo anterior se concluye que el sistema de medición de capacitancia no representa riesgo en la determinación de la característica de calidad y es confiable según lo demuestra el sistema metrológico desarrollado.

**3. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS**

La situación actual de los procesos en el área de prueba final de los productos es compleja, ya que el producto es probado y/o evaluado en diversas

características eléctricas. Debido a ello se ha considerado que una aplicación innovadora del Control Estadístico de Procesos (CEP) sería la herramienta más adecuada por el momento para reducir rechazos e incrementar el rendimiento, *yield*.

- Las etapas seguidas para esto son las siguientes:
- Identificación y selección de datos para el análisis estadístico.
  - Pruebas estadísticas preliminares.
  - Selección de los límites de control a través del cálculo de límites de control estadístico.
  - Determinación de la capacidad del proceso y otros parámetros relevantes, para una característica de calidad.
  - Análisis de modelo multivariado para 2 o más características de calidad de manera simultánea.
  - Propuestas de mejora para diseño robusto.

A continuación se explica como se desarrollaron las etapas planteadas:

- Identificación y selección de datos para CEP. Para la identificación y selección de los datos, se evalúan inicialmente los procesos y/o productos claves que representan una mejor área de oportunidad, tanto por su costo como por el volumen de producto no conforme. La Tabla 2 indica datos del producto seleccionado para el análisis. Posteriormente se seleccionan y colectan los datos de la muestra, para ello se definen como mínimo muestras de 30 datos con subgrupos a tamaño "n" igual a 3. Los datos colectados del número de parte SMP-1340-079LF se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Selección a producto para análisis estadístico.

Número de parte	Piezas probadas	Piezas rechazadas	Yield %
SMP1340-079LF	22920814	2368763	89.67

- Pruebas estadísticas preliminares. Previo a la evaluación y/o establecimiento de los límites de control estadístico del proceso, se analiza la función de distribución de los datos colectados, los cuales se espera tengan una distribución normal. De no ser así, la distribución obtenida debe ser normalizada para que puedan ser establecidos los límites de control estadístico. Los datos se asumieron normalizados.

- Selección de los límites de control. Para conocer este estadístico, se analizaron los datos arriba mencionados usando el *minitab* como

herramienta de cálculo y estimación de los mismos y tomando como base de referencia el libro "Control estadístico de la calidad" [3]. Los resultados se muestran en la gráfica de la Fig. 6.

Datos	Capacitancia (pF)	Datos	Capacitancia (pF)	Datos	Capacitancia (pF)
1	0.232	16	0.233	17	0.207
2	0.232	17	0.231	18	0.204
3	0.234	18	0.232	19	0.199
4	0.232	19	0.231	20	0.211
5	0.234	20	0.199	21	0.17
6	0.232	21	0.23	22	0.226
7	0.232	22	0.232	23	0.223
8	0.232	23	0.232	24	0.195
9	0.235	24	0.232	25	0.227
10	0.234	25	0.177	26	0.228
11	0.235	26	0.175	27	0.207
12	0.233	27	0.231	28	0.227
13	0.233	28	0.182	29	0.229
14	0.234	29	0.232	30	0.226
15	0.203	30	0.232	31	0.229
16	0.23	31	0.229	32	0.226
17	0.232	32	0.232	33	0.226
18	0.23	33	0.23	34	0.239
19	0.233	34	0.169	35	0.241
20	0.228	35	0.212	36	0.237
21	0.232	36	0.232	37	0.237
22	0.233	37	0.23	38	0.24
23	0.231	38	0.231	39	0.238
24	0.234	39	0.162	40	0.237
25	0.233	40	0.233	41	0.168
26	0.233	41	0.204	42	0.236
27	0.233	42	0.2	43	0.24
28	0.233	43	0.198	44	0.232
29	0.233	44	0.201	45	0.233
30	0.229	45	0.188	46	0.228

Fig. 6. Datos colectados de medición de capacitancia.

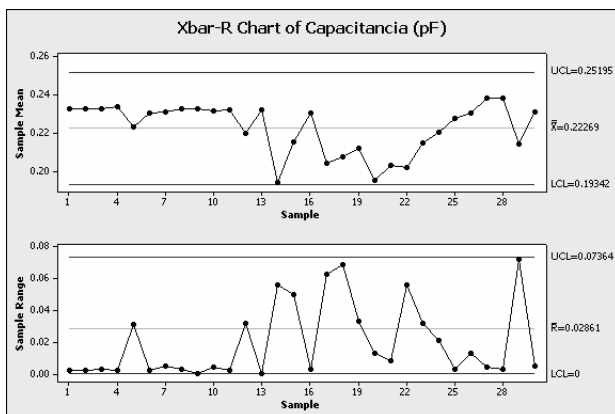


Fig.7. Análisis de control estadístico de procesos de los datos de la Fig. 6.

Como es posible observar en la Fig. 7, los resultados demuestran que el proceso de medición de capacitancia en el intervalo a 0.2 pF se encuentra bajo control estadístico de proceso.

d) Determinación de la capacidad de proceso.

Una vez asegurado que el proceso se encuentra bajo control estadístico, se calculan una serie de estadísticos que nos permitirán tener una mejor información sobre la capacidad del proceso y la interacción entre éste y las variaciones del sistema de medición con respecto a la habilidad que ambos tienen para lograr y determinar la conformidad del producto. Los indicadores a estimar son la *capacidad de proceso* ( $C_p$ ) y la *capacidad real* de este último con respecto a las especificaciones del producto ( $C_{pk}$ ). En la Fig. 8, se muestran los cálculos obtenidos de ambos indicadores estadísticos.

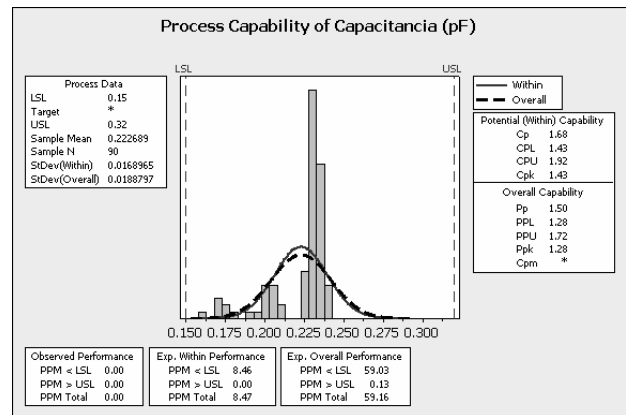


Fig.8. Gráfico de control de procesos y cálculo de Cpk.

Como se puede observar, la capacidad del proceso es aparentemente adecuada y los datos de variación graficados en la curva normal se encuentran dentro de los límites de control del producto. Sin embargo, estos datos inicialmente tenían un corrimiento en la media de los valores medidos como se indicó en la Fig. 7. La corrección del error permitió en este caso disminuir el corrimiento a la media.

En términos generales, se concluye que el proceso es capaz de cumplir las especificaciones del producto sin embargo, la probabilidad de encontrar producto no conforme puede disminuirse si se reduce el corrimiento de la media y se centra más el proceso. En un inciso anterior, se concluyó que la desviación del sistema de medición y su incertidumbre asociada no son significativos o no impactan la calidad del producto, por lo que el corrimiento de la media será atribuible a factores externos a la medición.

e) Planteamiento del problema multivariado. Como se ha visto en la sección anterior, la aplicación de CEP para verificar una característica de calidad ya ha dado resultados positivos, permitiendo ajustar la media y mejorar el rendimiento *yield*. No obstante, en la gran mayoría de los productos de la planta, una pieza tiene que cumplir entre 3 y 8 características de calidad que, de no lograrse, provocan rechazo. Un resumen de éstas es la tabla de variables críticas mencionada en la sección 2.1-a (Tabla 1) y se puede representar gráficamente como se muestra en la Fig. 9.

Un problema importante surge debido a que estas variables o parámetros críticos de la pieza no son independientes. Una variación determinada en una variable de proceso, como pudiera ser una presión o temperatura, o un parámetro intermedio del producto, como pudiera ser el espesor de una película, pueden tener un efecto positivo en una característica de calidad y negativo en otra.

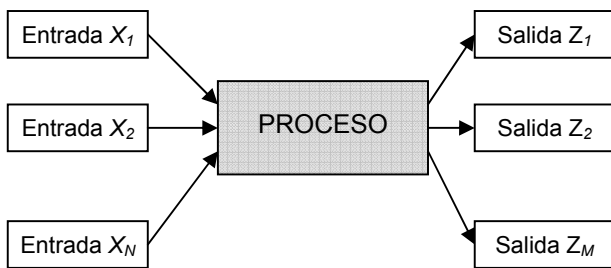


Fig. 9. Diagrama esquemático de múltiples entradas y salidas del proceso.

En el ejemplo de la sección anterior, los cambios en el proceso para centrar la variable elegida podrían haber tenido efectos negativos en otra variable.

Como se observó en la sección 2.1-a [1], las tablas de variables críticas para procesos y producto ascendieron a 44 combinaciones en el primero y 108 combinaciones variable-intervalo-incertidumbre. Esto da una idea de la complejidad de las interrelaciones que se pueden dar entre entradas y salidas. Un producto típico de la planta tiene alrededor de 5 características de calidad simultáneamente.

Con base en esta situación real y en los avances obtenidos hasta la fecha, tanto en el aseguramiento metrológico como en la aplicación de CEP monovariado, se está en el proceso de plantear un modelo de control estadístico de procesos

multivariado. Los criterios de prioridad para las características de calidad se asignarán conforme a un sistema de ponderación a definir con base en la experiencia y, sobre todo, en su influencia en el desempeño final del producto.

La Tabla 3 muestra una tabla hipotética con algunos parámetros de calidad a controlar.

Tabla 3. Parámetros de calidad.

Característica de calidad	Ponderación	Tolerancias LSC-LIC	Incertidumbre
Potencia de salida	15%	-70 dBm a +20 dBm	±0,2 dB
Tensión de salida	15%	0 V a ±15 V	± 1x10 <sup>-3</sup> de la lectura
Atenuación	20%	10 dB	±0,1 dB
Factor de calibración	20%	0,8 W/W a 1 W/W	±0,03 W/W
Capacitancia	30%	0.01 a 1280 pF	±0.01 pF

- El análisis multivariado de estos procesos y características de calidad del producto implicará: Análisis individual de cada característica de calidad y definición de óptimos relativos.
- Análisis bivariado en combinaciones e identificación de correlaciones directas e inversas.
- Definición de modelo de optimización con base en análisis de diferentes criterios y técnicas de investigación de operaciones.
- Análisis multivariado y obtención de valores óptimos para cada parte.

h) Propuestas de mejora para diseño robusto. Como fruto de todo lo anterior se aspira a la mejora o reducción de la variación del sistema. Si la fuente predominante es la reproducibilidad, esta estará enfocada en mejorar y estandarizar el método de medición y entrenamiento de personal, en caso que la fuente de variación haya sido por la influencia de la repetibilidad, se enfocará a mejorar y disminuir las variaciones debidas al equipo de medición. Para conocer el impacto de ambos factores en el punto 4 se estima y calcula el porcentaje de variación aplicando el método a análisis a varianza (ANOVA) recomendado en el AIAG MSA [4].

#### 4. INTERACCIONES ENTRE CAPACIDAD DE MEDICIÓN Y CAPACIDAD DE PROCESOS

Análisis de variabilidad del sistema de medición (estudios de repetibilidad y reproducibilidad), con

ello conoceremos la relación entre la variación del sistema de medición y el proceso referidas al total de la variación, además nos indica dentro de la variación de las mediciones que en la fuente de mayor impacto, se espera que la variación del sistema de medición sea mínima (< 10 %).

El análisis de variación se aplicó por las condiciones del producto bajo estudio, solo como un análisis de repetibilidad, considerando que el sistema de medición es una actividad 100 % automatizada.

El porcentaje de variación obtenido con respecto a las especificaciones del producto fue a 5.37 % (Fig. 10) lo cual se encuentra dentro de los porcentajes aceptables. Con ello se encuentra nuevamente que el sistema de medición es confiable y no contribuye como factor de riesgo en la variación obtenida del proceso Cp y Cpk.

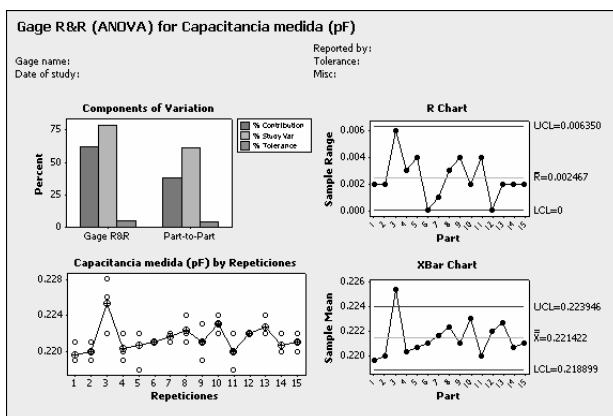


Fig. 10. Análisis de repetibilidad.

**5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

A través del modelo propuesto y desarrollado en este proyecto, dónde se aplicaron diversas herramientas estadísticas, se concluye lo siguiente:

1. El modelo permite a partir de un conjunto de datos o muestreo, establecer límites de control estadístico del proceso, determinar sus límites

naturales, capacidad potencial, la capacidad real del mismo, así como la variación del sistema de medición y su interrelación.

2. El análisis realizado como prototipo nos permite garantizar que el proceso bajo estudio es capaz de cumplir las especificaciones definidas para el producto y que el sistema de medición es adecuado para medir y determinar la conformidad del mismo, por lo cual se incrementa la confiabilidad y certeza del producto que esta entregando al cliente, permite también identificar cualquier oportunidad de mejora en caso de detectarse alguna desviación.
3. Cómo trabajo futuro se espera realizar un análisis a otros sistemas con características más complejas aplicando el modelo propuesto además de incluir análisis multivariados, evaluación e impacto económico, aplicación de un esquema de ciclo de mejora y la medición de efectividad a esta propuesta con el fin de establecerlo como un sistema que nos permita tener un área metroológica que contribuya en la mejora a la calidad.

**REFERENCIAS**

- [1] García Ruiz, I. *et al.* Informes Etapa I, II y III de MESURA-Skyworks, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, (2006).
- [2] Schmid, W. A. *et al*; Guía para el desarrollo y estimación a incertidumbre, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, (2000).
- [3] Montgomery, D., Introducción al modelo estadístico de la calidad, Limusa, Ciudad de México (1999).
- [4] Daimler-Chrysler, Ford Motor & General Motors, Automotive Industry Action Group (AIAG) and MSA, Measurement Systems Analysis, Third Edition, Second Printing.