

• • • • • • •

REDUCCIÓN DE LEAD TIME Y DEL SCRAP POR TORQUE ALTO EN LA LÍNEA DE ENSAMBLE DE TARJETAS PCBA

Reporte Técnico de
Mejora Continua

Monterrey, Nuevo León
Julio de 2026

• • • • •

Desarrollado por : Jehu Lara Corona

• • • • •

**Especialista en Metodología Lean Six
Sigma y Análisis de Datos**

• • • • •

• • • • •

Nota Metodológica del Autor

-Este reporte técnico utiliza un conjunto de datos ilustrativo, diseñado deliberadamente para representar un escenario realista de manufactura automotriz y demostrar la aplicación rigurosa, correcta y completa de las herramientas estadísticas de la metodología DMAIC. La estructura metodológica, las fórmulas aplicadas, la interpretación estadística y las conclusiones son íntegramente transferibles a un entorno productivo real. Los valores numéricos específicos expuestos en este documento deben ser re-validados con datos de planta físicos (mediante PPAP o corridas de validación) antes de su implementación definitiva en piso de producción.

Rol y participación del candidato

Rol del candidato: Green Belt y líder técnico del proyecto DMAIC. El candidato participó activamente en la definición del Caso de Negocio, delimitación del alcance, construcción del Project Charter, análisis del flujo de valor, validación del sistema de medición, evaluación de capacidad, análisis de varianza, diseño y análisis del DOE, evaluación financiera, elaboración del PFMEA, desarrollo del Plan de Control, definición de los planes de reacción y diseño del sistema de transferencia y seguimiento.

Responsabilidades principales: Coordinar el análisis metodológico, asegurar la trazabilidad de los cálculos, documentar los supuestos, facilitar la participación del equipo multifuncional y presentar las recomendaciones técnicas al Champion y al Process Owner.

Límites de autoridad: El candidato desarrolla y recomienda las acciones del proyecto, pero la autorización de implementación, liberación de recursos, aprobación de PPAP, validación financiera y transferencia definitiva del proceso corresponde al Champion, al Process Owner y a las áreas funcionales responsables.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Nota Metodológica y Rol del Candidato	2
---	---

FASE DEFINIR (DEFINE) 4

1.1 Project Charter, CTQs, Métricas y Alcance	4
1.2 Cronograma Maestro del Proyecto	5
1.3 Caso de Negocio, Beneficios Financieros y ROI	6
1.4 Recursos, Inversión y Supuestos Financieros	7
1.5 Diagrama SIPOC	8

FASE MEDIR (MEASURE) 9

2.1 Mapa del Flujo de Valor Actual — VSM Actual	9
2.2 Pareto de Defectos	10
2.3 Estabilidad del Proceso — Gráfica de Corridas	11
2.4 Validación del Sistema de Medición — Gage R&R	12
2.5 Análisis de Capacidad Inicial y PPM	13
2.6 Diseño del Estado Futuro — VSM Futuro	14
2.7 Conclusión y Limitaciones de la Fase Medir	15

FASE ANALIZAR (ANALYZE) 16

3.1 Identificación y Priorización de Factores — Ishikawa y C&E ...	16
3.2 Validación de Supuestos del Modelo ANOVA	17
3.3 Hallazgos del Análisis de Varianza	18
3.4 Efectos Principales y Conclusión de la Fase Analizar	19

FASE MEJORAR (IMPROVE) 20

4.1 Diseño de Experimentos — DOE Factorial 2 ²	20
4.2 Linealidad, Modelo de Regresión y Residuos	21
4.3 Optimización de la Respuesta	23
4.4 Predicción y Balanceo del Tiempo de Ciclo	24

FASE CONTROLAR (CONTROL) 25

5.1 Validación del Proceso — Corrida Piloto	25
5.2 PFMEA de Proceso y Riesgo Residual Proyectado	27
5.3 Plan de Control y Planes de Reacción	30
5.4 Matriz de Capacitación y Certificación de Competencias ...	33
5.5 Acta de Transferencia al Process Owner	34
5.6 Plan de Seguimiento y Verificación 30/60/90	36

Validación Financiera y Cierre Operativo — Proyección..... 37

Reducción del Lead Time y del Scrap Atribuible a Torque Alto en la Línea de Ensamble de Tarjetas PCBA

CASO DE NEGOCIO

La línea de ensamble de tarjetas PCBA para un cliente OEM presenta un Lead Time de 13.5 días, provocado principalmente por exceso de inventario, y una tasa de Scrap total de 5.0% equivalente a 50,000 PPM. El análisis de Pareto inicial indica que Torque Alto representa aproximadamente 62% de los defectos; por tanto, la línea base atribuible al alcance de este proyecto es de 3.1% de la producción, equivalente a 31,000 PPM. El Costo de Pobre Calidad total de la estación asciende a **\$45,000 USD anuales**.

CTQs

- 1-Cumplimiento de la demanda diaria de 500 piezas sin retrasos de entrega.
- 2-Fuerza de Torque de sujeción de la carcasa estrictamente en 15.0 ± 1.0 lb-in.

MÉTRICAS (ACTUAL VS. OBJETIVO)

Línea Base Actual:

- Lead Time total: 13.5 días.
 - Scrap total de ensamble: 5.0% — 50,000 PPM.
 - Scrap atribuible a Torque Alto: 3.1% — 31,000 PPM.
 - Capacidad del proceso de torque: media = 15.4 lb-in; Cpk = 0.67.
- Meta del Proyecto:
- Lead Time total: <8.0 días.
 - Scrap atribuible a Torque Alto: <0.5% — <5,000 PPM.
 - Centrado del torque: 15.0 lb-in.
 - Capacidad del proceso: Cpk ≥ 1.33 .

ALCANCE (IN-SCOPE / OUT-OF-SCOPE)

Dentro del alcance: El flujo de valor desde la recepción en SMT hasta el embarque final. La aplicación de DMAIC y Diseño de Experimentos se enfocará exclusivamente en la estación de Ensamble Manual.

Fuera del alcance: Rediseño del PCB por parte de ingeniería de producto y cambios de proveedores de resina o componentes electrónicos.

BENEFICIOS FINANCIEROS Y RECURSOS

Ahorro anual proyectado al cumplimiento de la meta: **\$19,760 USD**.
Ahorro potencial máximo: hasta **\$23,560 USD**.
Inversión: **\$9,120 USD**.
ROI proyectado: **116.7%**.
Beneficio de WIP excluido hasta su reconciliación.

EQUIPO DMAIC Y CRONOGRAMA

Champion: Gerente de Operaciones | Process Owner: Supervisor de Ensamble
Plazo de Ejecución (16 Semanas):

Define / Measure: Semanas 1 a 3

Analyze / Improve: Semanas 4 a 9

Piloto / PPAP: Semanas 10 a 12

Control / Cierre: Semanas 13 a 16

1.2 Cronograma Maestro del Proyecto

PLAN DE PROYECTO DMAIC - CRONOGRAMA Y ENTREGABLES

Metodología: Lean Six Sigma (Gantt)

Actividad	Responsable	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	Entregable
Charter, VOC, CTQ y SIPOC	Green Belt / Champion	■	■															Charter aprobado
VSM actual, Pareto y línea base	Green Belt / Producción			■	■	■												Línea base
MSA, corrida y capacidad inicial	Calidad / Green Belt						■	■										Measure concluida
Ishikawa, C&E y ANOVA	Equipo DMAIC								■	■	■							Factores dominantes
DOE y optimización	Green Belt / Ingeniería											■	■	■	■			Baja-85 psi
VSM futuro y balanceo	Ingeniería Industrial													■	■			Diseño futuro
Piloto y preparación PPAP	Calidad / Producción															■	■	Evidencia preliminar
PFMEA y Plan de Control	Equipo multifuncional															■	■	Control propuesto
Capacitación y transferencia	Process Owner / Calidad															■	■	Competencias y acta
Seguimiento y cierre técnico	Champion / Finanzas															■	■	Plan 30/60/90

Nota: El cronograma se representa en semanas (S).

Nota: El cronograma representa la secuencia planificada del escenario ilustrativo. La implementación física, PPAP y verificación posterior deberán ajustarse al calendario real de planta.

Nota de prevalencia del cronograma: Para fines de control del proyecto, prevalecen las ventanas declaradas en el Project Charter: Define/Measure —semanas 1 a 3—, Analyze/Improve —semanas 4 a 9—, Piloto/PPAP —semanas 10 a 12— y Control/Cierre —semanas 13 a 16—. Los marcadores del gráfico representan la secuencia visual de los entregables dentro de estas ventanas.

1.3 Caso de Negocio, Beneficios Financieros y ROI

El Costo de Pobre Calidad actual de la estación de ensamble asciende a \$45,000 USD anuales. De este monto, \$38,000 USD corresponden al costo directo del material y la mano de obra asociados con el total de piezas desechadas, mientras que \$7,000 USD corresponden a costos adicionales por reproceso y tiempo de línea detenida.

El análisis de Pareto determinó que Torque Alto representa aproximadamente 62% de los defectos totales. Considerando una tasa de Scrap total de 5.0%, la proporción atribuible a Torque Alto se estima en 3.1% de la producción:

$$5.0\% \times 62\% = 3.1\% = 31,000 \text{ PPM.}$$

Supuesto de atribución financiera: Para este ejercicio se considera que cada unidad rechazada se clasifica bajo una sola causa primaria dentro del Pareto y que el costo promedio directo de \$6.08 USD por pieza es aplicable a las distintas categorías de rechazo. Bajo este supuesto, la participación de 62% puede aplicarse a la tasa de Scrap total para estimar el componente atribuible a Torque Alto.

Sobre un volumen anual de 125,000 piezas, esta proporción representa 3,875 piezas rechazadas por año. A un costo directo de \$6.08 USD por pieza, el COPQ directo actualmente atribuible a Torque Alto asciende a \$23,560 USD anuales.

La meta del proyecto es reducir el Scrap atribuible a Torque Alto de 3.1% a menos de 0.5%. Utilizando 0.5% como límite conservador para el cálculo financiero, el costo residual máximo sería de \$3,800 USD anuales. Por tanto, el ahorro anual comprometido al cumplir la meta se estima en \$19,760 USD. Si el Scrap por Torque Alto se aproximara a cero, el ahorro potencial máximo sería de \$23,560 USD anuales.

Los \$7,000 USD asociados con reproceso y tiempo de línea detenida no se incluyen en el retorno financiero, ya que el documento no dispone actualmente de una asignación validada que determine qué proporción corresponde específicamente a Torque Alto.

ROI comprometido

$$\text{ROI} = (\$19,760 - \$9,120) / \$9,120 \times 100$$

$$\text{ROI} = 116.7\%$$

Periodo estimado de recuperación

$$\text{Payback} = \$9,120 / \$19,760 \times 12$$

$$\text{Payback} = 5.5 \text{ meses}$$

El ROI potencial máximo sería de 158.3% únicamente si el Scrap atribuible a Torque Alto se aproximara a cero.

Nota: El beneficio asociado con la reducción de WIP se mantiene fuera del cálculo de ROI hasta reconciliar los inventarios del VSM actual y futuro. Una vez validado, deberá clasificarse como liberación no recurrente de capital de trabajo y no como ahorro anual recurrente.

RESUMEN DE COSTOS DE MALA CALIDAD (COPQ) Y AHORROS COMPROMETIDOS

CONCEPTO	MONTO ANUAL (USD)
Costo directo del Scrap total – todas las causas	\$38,000 USD
Costos indirectos por reproceso y línea detenida	\$7,000 USD
COPQ total actual de la estación	\$45,000 USD
COPQ directo atribuible a Torque Alto	\$23,560 USD
Costo residual máximo al alcanzar 0.5%	\$3,800 USD
Ahorro anual comprometido	\$19,760 USD
Ahorro potencial máximo si Torque Alto se aproxima a cero	Hasta \$23,560 USD

Supuesto financiero	Valor
Volumen anual	125,000 piezas
Scrap total actual	5.0%
Participación de Torque Alto	62%
Scrap atribuible a Torque Alto	3.1%
Meta de Scrap por Torque Alto	<0.5%
Costo directo por pieza rechazada	\$6.08 USD

Recurso / inversión	Costo
Torquímetro digital calibrado	\$2,500 USD
Licencia anual de Minitab	\$1,500 USD
Horas del equipo de mejora	\$5,120 USD
Inversión total	\$9,120 USD

Base del costo de horas del equipo: 4 personas × 4 horas por semana × 8 semanas de participación intensiva × \$40 USD/hora = \$5,120 USD. Las ocho semanas corresponden a la participación directa del equipo durante las actividades principales de análisis y mejora; el calendario completo del proyecto permanece en 16 semanas.

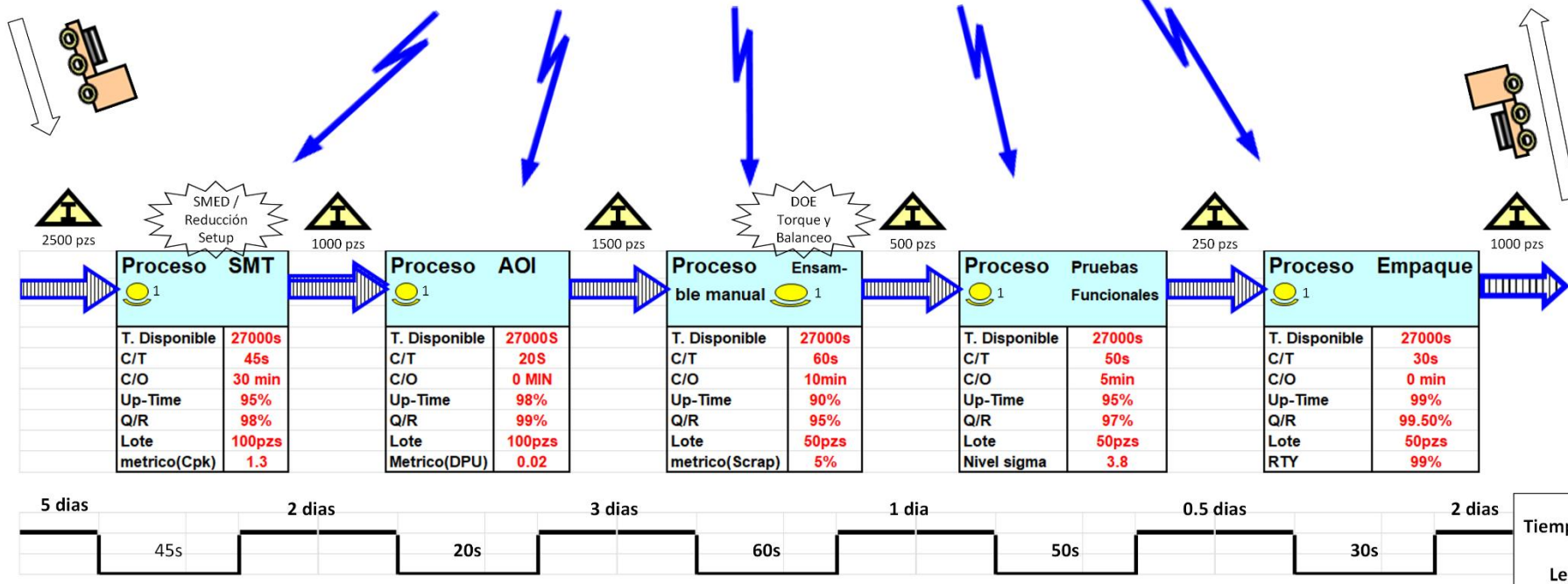
Supuesto	Valor
Demanda diaria	500 piezas/día
Días operativos considerados	250 días/año
Volumen anual estimado	125,000 piezas/año

$$500 \text{ piezas/día} \times 250 \text{ días/año} = 125,000 \text{ piezas/año}$$

Nota de cálculo: El volumen de 125,000 piezas anuales es el volumen implícito en el modelo financiero, obtenido a partir de 6,250 piezas rechazadas equivalentes a una tasa de Scrap total de 5.0%. Este volumen deberá confirmarse con el calendario real de producción.

Aclaración terminológica: En este reporte, las expresiones “ahorro comprometido” y “ROI comprometido” se utilizan para identificar valores proyectados condicionados al cumplimiento de la meta del proyecto. No representan beneficios financieros ya validados con datos reales de producción.

Proveedor (Supplier)	Entradas (Inputs)	Proceso (Process)	Salidas (Outputs)	Cliente (Customer)
Almacén / SMT	PCBA, Carcasas, Tornillería	1. Tomar PCBA e inspeccionar.	Ensamble alineado	Proceso Pruebas Func.
Ingeniería/Calidad	Especificación: 15.0 ± 1.0 lb-in	2. Posicionar en carcasa.	Tarjeta sujeta	Cliente OEM
Mantenimiento	Presión de Aire, Herramienta	3. Atornillar con torquímetro.	Registro de torque	Operador
Operador	Inspección visual	4. Liberar pieza a la banda.	Producto liberado	



Desperdicios Identificados y Conclusión de la Fase de Medición:

El análisis del estado actual confirma que la línea de ensamble sufre de un Lead Time elevado (13.5 días) causado por una acumulación severa de inventario (muda de espera) impulsado por un sistema de programación *Push* y *lotes grandes*. *Físicamente, la estación de Ensamble Manual representa una restricción de capacidad* (cuello de botella), ya que su Tiempo de Ciclo (60s) supera el Takt Time del cliente (54s).

Adicionalmente, los métricos Six Sigma revelan un problema de calidad crítico: este proceso manual genera un 5% de Scrap, impactando el RTY global. La mejora requerirá un rediseño del flujo logístico para abatir el Lead Time y un análisis estadístico profundo (DMAIC) en la estación de ensamble para reducir el Tiempo de Ciclo y reducir el componente de Scrap atribuible a Torque Alto.

Propuestas de Mejora:

Balanceo de Línea: Redistribuir operaciones en el Ensamble para bajar el C/T a menos de 54s.

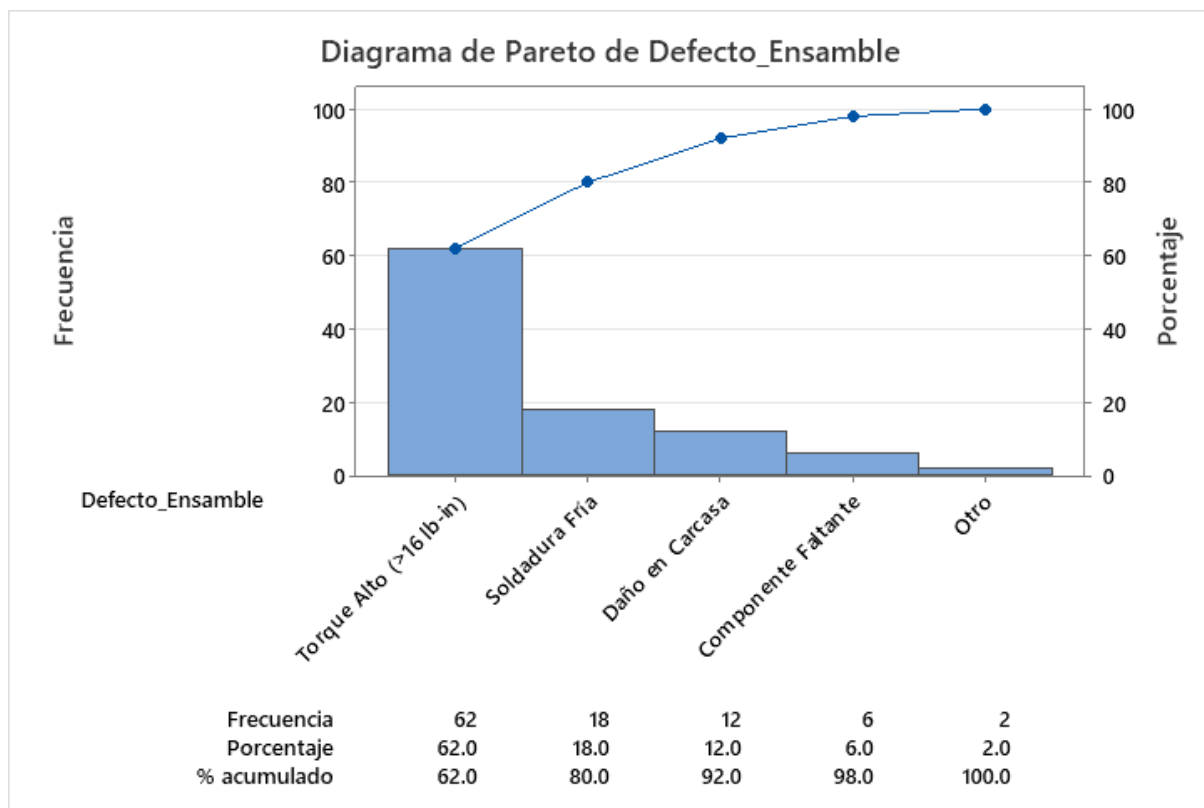
Sistema Pull (Kanban): Implementar señales Kanban entre Inspección y Ensamble para evitar la sobreproducción.

Proyecto DMAIC: Ejecutar un análisis de causa raíz en el Ensamble Manual para reducir el Scrap atribuible a Torque Alto de 3.1% a menos de 0.5%, manteniendo fuera del alcance directo el 1.9% asociado con otras categorías de defecto.

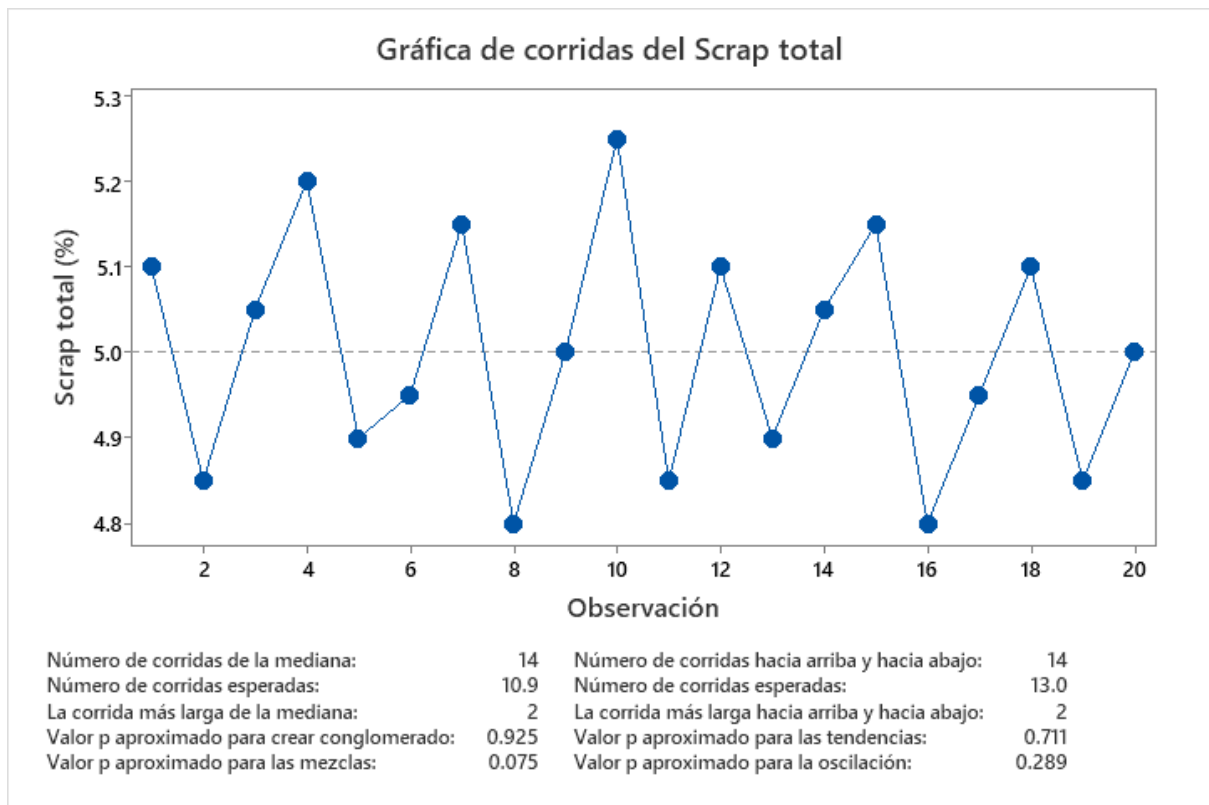
Evento SMED: Reducir el tiempo de preparación (C/O) de 30 minutos en el proceso SMT.

El Rendimiento Acumulado (RTY Global) de 88.96% se calculó multiplicando el rendimiento de calidad (Q/R) de cada estación. Estos porcentajes de rendimiento (98%, 99%, 95%, 97%, 99.5%) fueron extraídos de los registros históricos del sistema ERP y los reportes de inspección de la estación AOI, confirmando que el mayor impacto negativo ocurre en la estación de Ensamble Manual (95%).

Pareto de defectos de ensamble — Muestra ilustrativa n=100



Al analizar la tasa de Scrap total de 5.0% reportada en la estación de Ensamble Manual, el Diagrama de Pareto, construido a partir de una muestra ilustrativa de 100 defectos consecutivos correspondientes a un periodo de dos semanas, indica que 62% de las fallas corresponden a Torque Alto. Aplicando esta proporción sobre la línea base total de 5.0%, el Scrap estimado atribuible a Torque Alto es de 3.1% de la producción, equivalente a 31,000 PPM. Por tanto, el proyecto se enfocará en reducir este componente dominante mediante el control de la variable crítica de torque, reconociendo que el 38% restante de los defectos se encuentra fuera del alcance directo de este proyecto DMAIC.



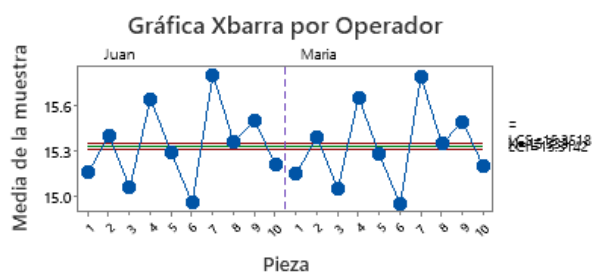
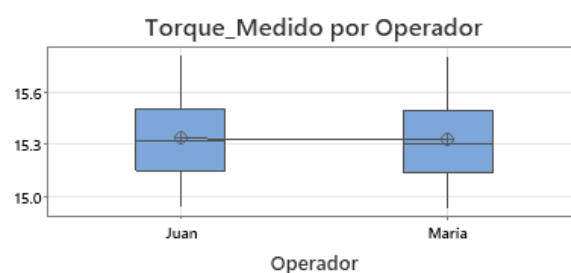
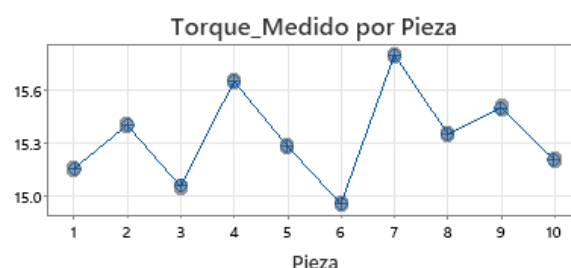
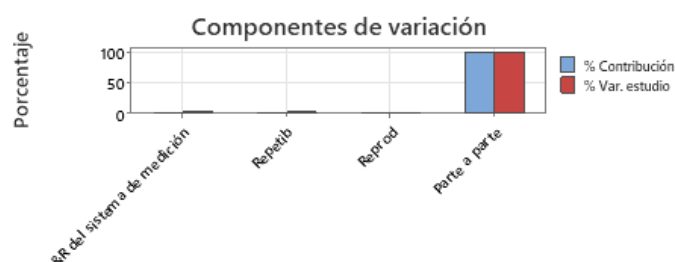
Estabilidad del Proceso (Línea Base):

La Gráfica de Corridas no detectó patrones estadísticamente significativos de agrupamiento, mezcla, tendencia u oscilación, dado que las pruebas presentaron valores $p > 0.05$. Este resultado aporta evidencia preliminar de consistencia temporal alrededor de una mediana de 5.0% de Scrap total, aunque no constituye por sí solo una demostración formal de control estadístico. El nivel sostenido de defectos justifica intervenir las variables de entrada del proceso.

Informe de R&R del sistema de medición (ANOVA) para Torque_

Nombre del sistema de medición :
Fecha del estudio:

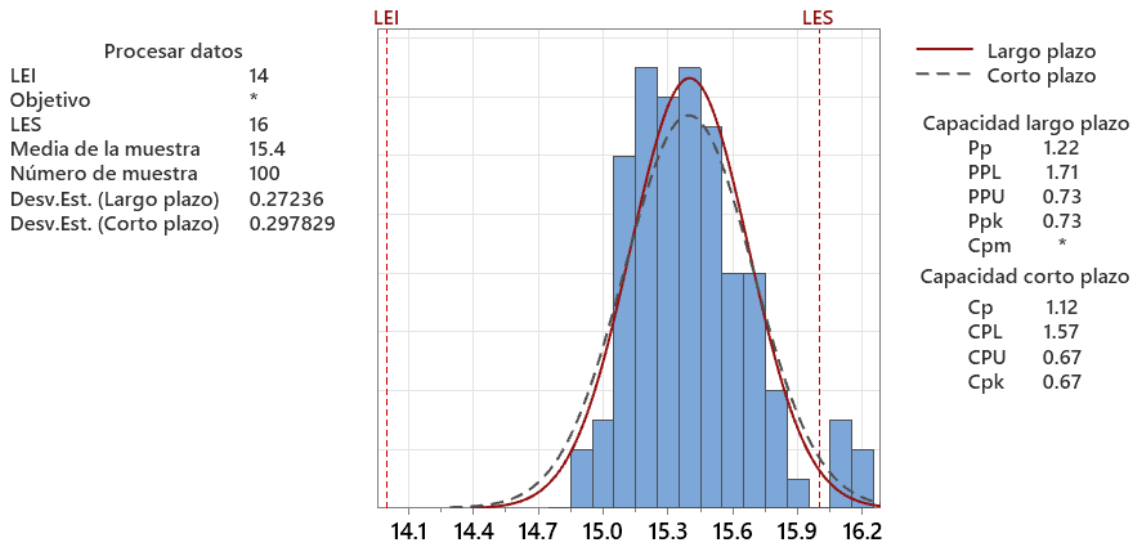
Notificado por:
Tolerancia:
Misc:



Conclusión del Sistema de Medición

El reporte de Minitab indica que, para el conjunto de datos ilustrativo evaluado, el sistema de medición presenta un desempeño aceptable. La variabilidad atribuible al instrumento y a los operadores arroja un %GRR total de 3.37%. Es imperativo notar que el estudio detecta una diferencia estadísticamente significativa entre operadores ($p = 0.00188$), atribuible a ligeras variaciones en la técnica de sujeción manual del torquímetro. Sin embargo, su impacto práctico —menor a 5% de la variación total— es insuficiente para explicar la línea base de 3.1% de Scrap atribuible a Torque Alto y, por sí solo, tampoco explica el 5.0% de Scrap total de la estación. El sistema es apto para medir el proceso, y este hallazgo es congruente con la validación posterior donde el operador no figura como factor dominante.

Informe de capacidad del proceso de Torque



	Rendimiento		
	Observado	Esperado Largo plazo	Esperado Corto plazo
PPM < LEI	0.00	0.14	1.30
PPM > LES	50000.00	13798.46	21974.42
PPM Total	50000.00	13798.60	21975.71

La dispersión real del proceso es representada por 6 sigma.

Análisis de Capacidad Inicial e Identificación del Sesgo

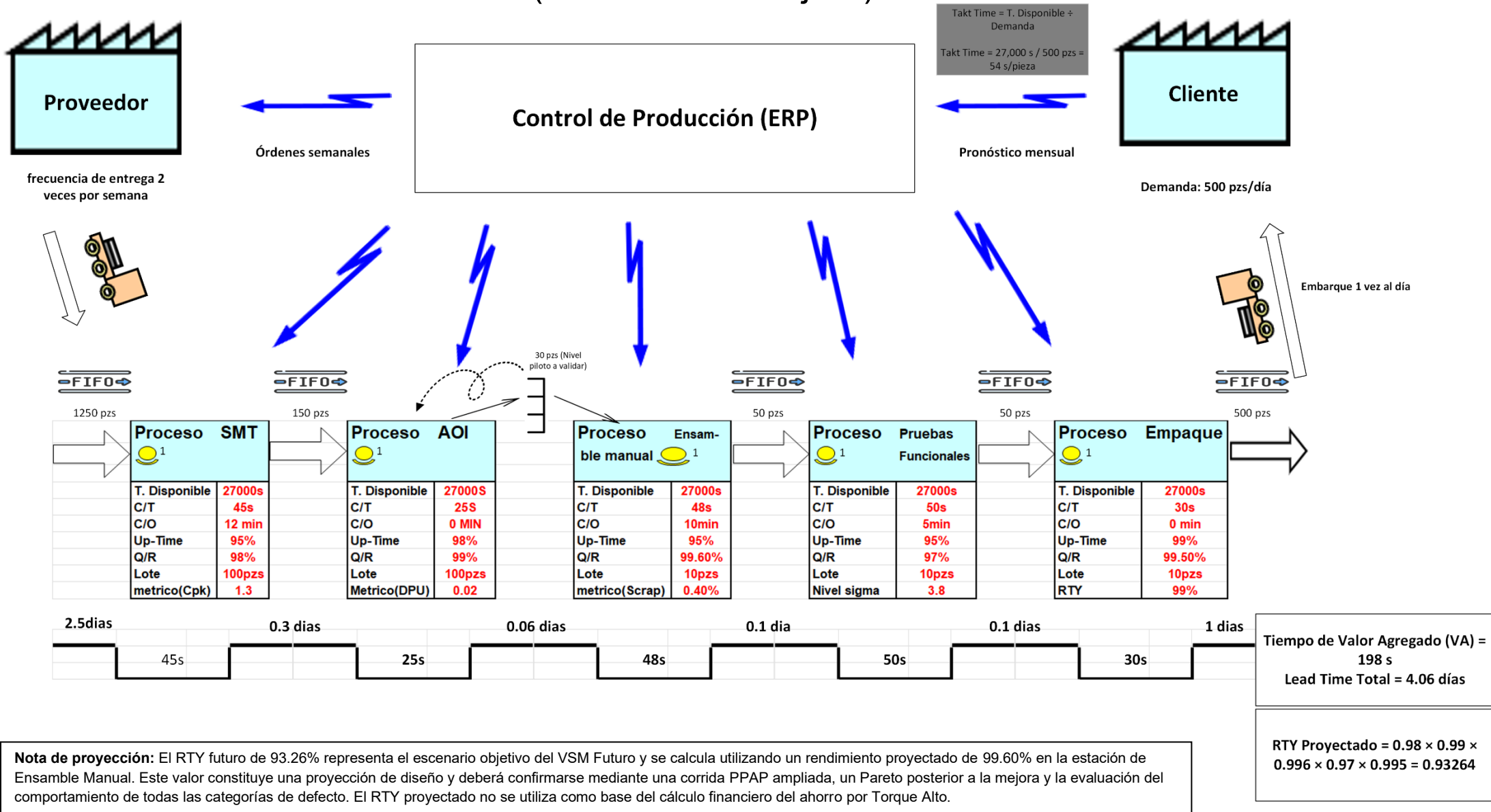
El histograma bajo el modelo paramétrico estándar arroja un C_p de 1.12 y un C_{pk} de 0.67. Sin embargo, el proceso es incapaz de cumplir con los requerimientos por un severo descentramiento (media de 15.4 lb-in).

Nota Técnica sobre Normalidad y Ajuste de Capacidad (PPM):

La prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling arrojó un Valor $p = 0.0152$, rechazando el supuesto de normalidad. Al forzar el modelo normal sobre estos datos, el software subestima drásticamente el problema, proyectando ~21,976 PPM esperados frente a los **50,000 PPM 5.0% observados en la muestra diagnóstica ilustrativa.**

En la muestra diagnóstica de capacidad de torque — $n=100$ —, cinco mediciones excedieron el límite superior de especificación, equivalente a 50,000 PPM muestrales fuera de especificación del CTQ. Este resultado corresponde exclusivamente a la muestra estadística de torque y no debe confundirse con la línea base financiera anual de Scrap atribuible a Torque Alto, estimada en 31,000 PPM mediante la combinación del Scrap total de 5.0% y la participación de 62% obtenida en el Pareto. Ambos indicadores utilizan fuentes y denominadores diferentes y deberán revalidarse con una muestra ampliada de producción.

Diseño del Estado Futuro (Transición a Mejora)



PROYECTO	QUÉ RESUELVE (IMPACTO EN VSM FUTURO)	FASE DMAIC
Evento SMED en SMT	Reduce el C/O de 30 min a 12 min, permitiendo lotes más pequeños.	Mejorar
DOE de Torque + Balanceo	Centra la media a 15.0 lb-in ($Cpk \geq 1.33$) y reduce el C/T de 60s a 48s.	Analizar / Mejorar
Sistema Pull (FIFO + Kanban)	Implementa supermercado (30 pzs) y reduce el Lead Time de 13.5 a 4.06 días.	Mejorar / Controlar
Negociación con Proveedor	Incrementa entregas a 2 por semana; reduce materia prima de 2500 a 1250 pzs.	Mejorar
Logística de Embarque Diario	Reduce el inventario de producto terminado de 1000 a 500 pzs.	Mejorar

Conclusión de la Fase de Medición: El análisis del estado actual confirma que la línea de ensamble sufre de un cuello de botella logístico (Lead Time de 13.5 días) y un problema de calidad crítico en la estación de Ensamble Manual. Mediante un Gage R&R se validó que el sistema de medición es confiable. La gráfica de corridas aporta evidencia preliminar de consistencia temporal del nivel de defectos, mientras que el análisis de capacidad ($Cpk = 0.67$) reveló que el proceso de torque es incapaz y se encuentra descentrado. El Pareto indica que Torque Alto representa 62% del Scrap total, equivalente a una tasa atribuible estimada de 3.1% de la producción.

El valor $Cpk = 0.67$ se interpreta como un indicador diagnóstico provisional, debido a que la racionalidad operacional de los subgrupos y la estabilidad temporal de la serie de torque no pudieron confirmarse con la información ilustrativa disponible. La conclusión de desempeño insuficiente se respalda adicionalmente en las cinco observaciones fuera de especificación identificadas en la muestra.

Limitaciones de la Fase Medir: Se reconoce que la métrica de normalidad no se cumple en la línea base y que los tamaños de muestra del diagnóstico inicial responden a la disponibilidad operativa de las primeras semanas. Estas limitantes serán abordadas en las fases posteriores mediante estratificación de datos y modelado de regresión controlada.

Fase de Análisis

Identificación de Factores Dominantes mediante ANOVA

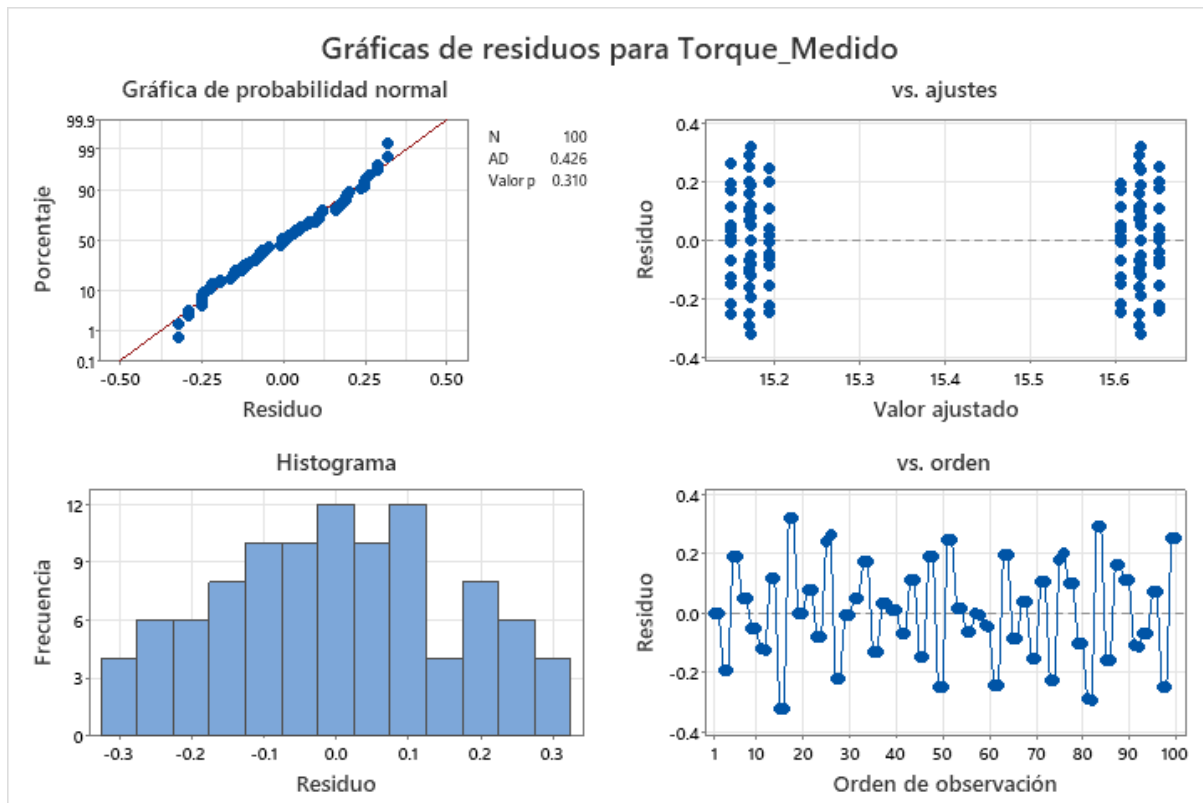
Para identificar los factores asociados con el descentramiento de la fuerza de torque (detectado en la línea base con una media de 15.4 lb-in), se recolectó y estratificó una nueva muestra representativa de 100 ciclos bajo condiciones controladas. El objetivo de este muestreo fue aislar el efecto de tres factores discretos (Turno, Operador y Velocidad de la Herramienta) para analizar su impacto sobre la variable de respuesta continua (Torque_Medido).

Generación de Hipótesis y Priorización (C&E): Previo al diseño del muestreo estratificado, el equipo desarrolló un análisis de Ishikawa evaluando las 6M. Las causas potenciales fueron sometidas a una Matriz de Priorización empírica (evaluando el Impacto en el CTQ y la Facilidad de Prueba). Como se ilustra a continuación, las variables de Velocidad, Operador y Turno obtuvieron los puntajes más altos, siendo seleccionadas como los tres factores exclusivos para ingresar al modelo ANOVA.

DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO (ISHIKAWA) DE LAS 6M PARA VARIACIÓN EN EL CTQ



Para la Fase Analizar, se generó un muestreo estratificado de 100 corridas con representación de las ocho combinaciones de Turno, Operador y Velocidad. Debido a que el número total de observaciones no permite una replicación completamente balanceada, el modelo se evaluó mediante sumas de cuadrados ajustadas.



Validación de Supuestos del Modelo ANOVA:

- **Normalidad:** La prueba de Anderson-Darling arrojó $p = 0.310$, por lo que no se rechaza el supuesto de normalidad de los residuos. La falta de normalidad observada en la Fase Medir $p = 0.0152$ es consistente con una posible mezcla de subpoblaciones asociada con velocidades de operación no estandarizadas. Al estratificar la muestra, los residuos del modelo presentan un comportamiento compatible con normalidad.
- **Homocedasticidad:** La gráfica de residuos contra ajustes sugiere visualmente una varianza constante entre los niveles.
- **Independencia y limitaciones:** Se reconoce un patrón de alternancia en la secuencia de la muestra utilizada durante la Fase Analizar. Por tanto, los resultados del ANOVA se interpretan como evidencia fuerte de asociación, pero no como demostración causal definitiva. La relación causal se evalúa posteriormente mediante el DOE con orden aleatorio reproducible; al tratarse de un escenario ilustrativo, su confirmación definitiva requerirá corridas de validación con datos reales de planta.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Turno	1	0.01166	0.01166	0.43	0.515
Operador	1	0.01348	0.01348	0.49	0.484
Velocidad_Herramienta	1	5.26021	5.26021	192.27	0.000
Error	96	2.62646	0.02736		
Falta de ajuste	4	0.01566	0.00392	0.14	0.968
Error puro	92	2.61079	0.02838		
Total	99	7.94160			

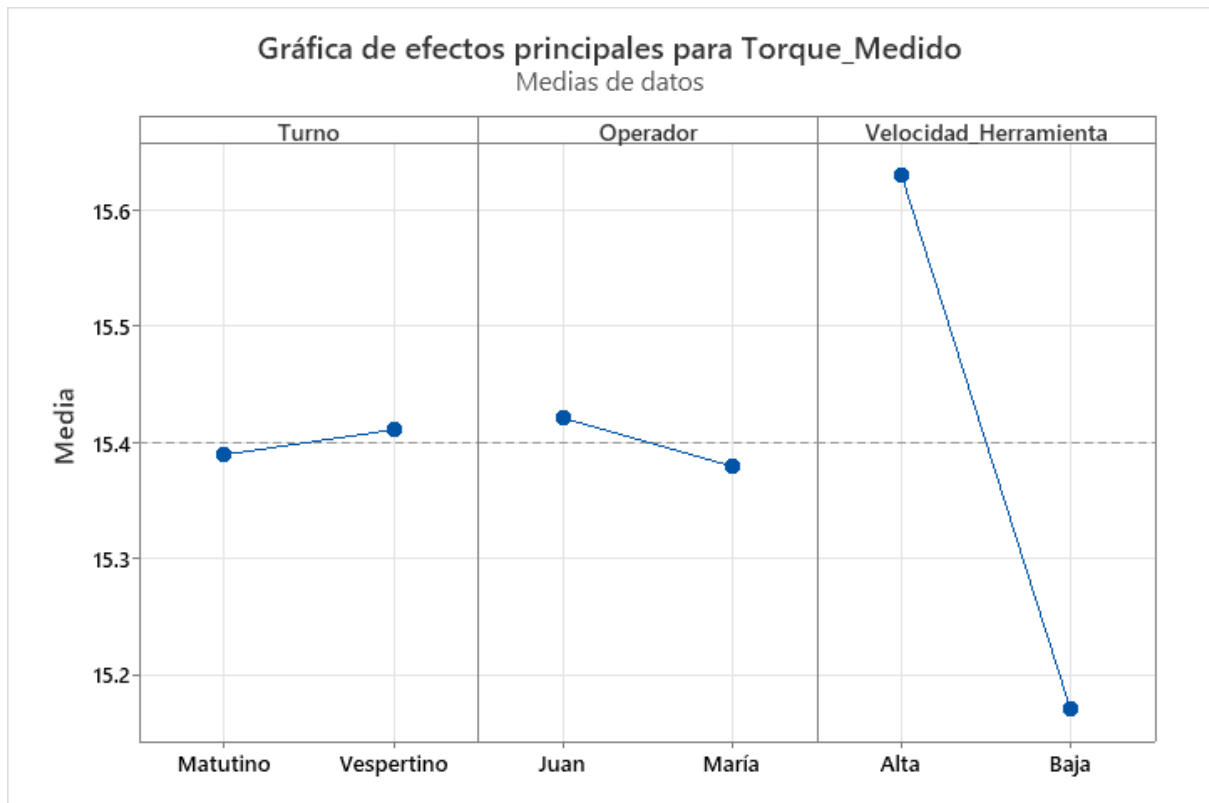
Resumen del modelo

	S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
	0.165405	66.93%	65.89%	64.12%

Hallazgos Estadísticos del Análisis de Varianza:

(Nota: El modelo inicial incluyó interacciones. Al no resultar significativas, se redujo al modelo de efectos principales).

- Factores No Significativos:** Turno ($p = 0.515$) y Operador ($p = 0.484$). No se detectaron efectos significativos sobre el torque bajo las condiciones y potencia de esta muestra.
- Factor Dominante Identificado:** La Velocidad de Herramienta presenta un valor $p < 0.001$, evidenciando una asociación estadística directa y contundente sobre el defecto de sobre-torque.
- Varianza Explicada (R^2):** El modelo completo explica el 66.93% de la variación del sistema, correspondiendo un 66.24% a la contribución directa de la Velocidad. El aproximadamente 33% de variación no explicada podría estar asociado con fuentes de ruido no incluidas en el modelo, como desgaste de la broca, variación del lote de tornillería, condiciones ambientales y error residual del sistema de medición. Estas fuentes no fueron cuantificadas individualmente en el presente análisis.

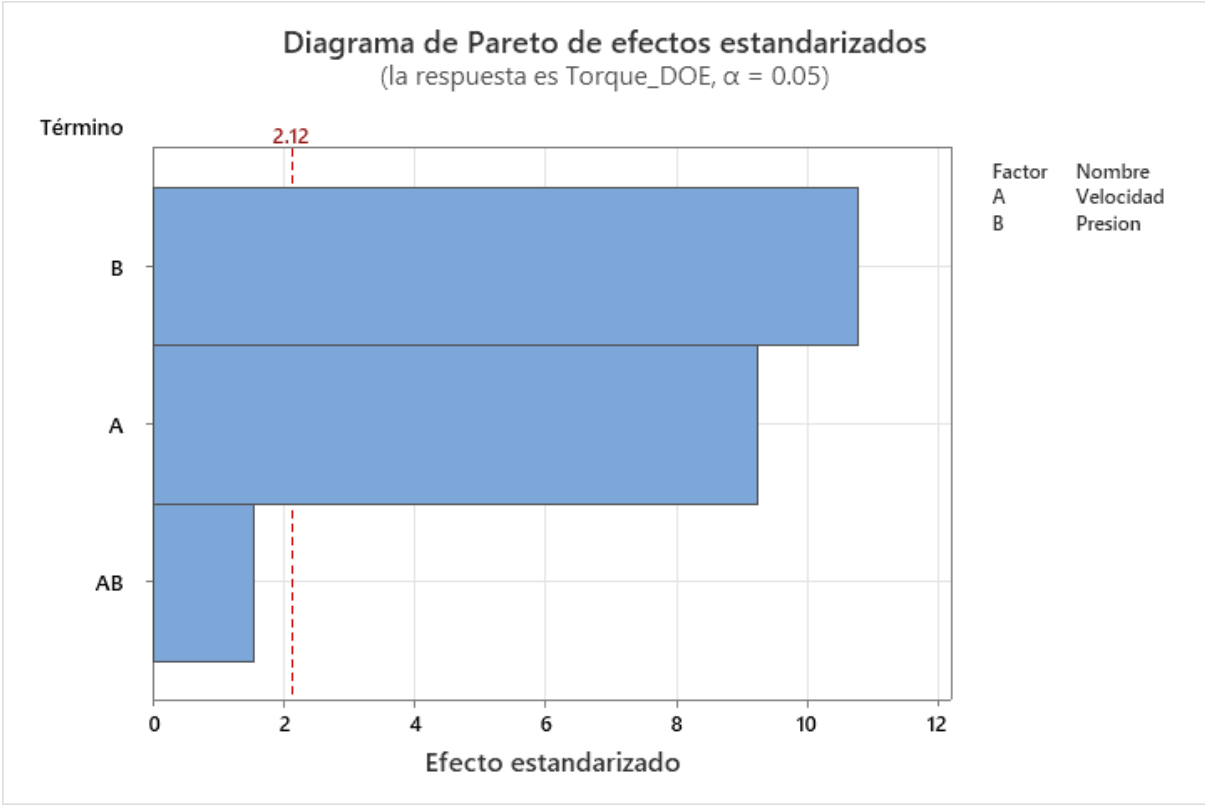


La Gráfica de Efectos Principales muestra que, bajo las condiciones evaluadas, la velocidad Alta está asociada con un incremento del torque promedio hasta aproximadamente 15.63 lb-in, mientras que la velocidad Baja reduce la respuesta promedio a aproximadamente 15.17 lb-in. La velocidad de la herramienta fue identificada como el factor dominante asociado con el sobre-torque y, por extensión, con el componente de 3.1% de Scrap atribuible a Torque Alto. Su efecto causal y los parámetros óptimos serán evaluados mediante el DOE de la Fase de Mejora.

Fase de Mejora (Improve)

Diseño de Experimentos — DOE factorial 2²

Con la Velocidad de la Herramienta identificada como el factor dominante asociado con el sobre-torque, se incorporó la Presión de Aire como una segunda variable controlable del proceso. Se construyó un diseño factorial completo 2², con cinco réplicas de cada combinación y un total de 20 corridas en orden aleatorio reproducible. Los factores evaluados fueron Velocidad de la Herramienta Baja y Alta y Presión de Aire 80 y 90 psi, utilizando el Torque Medido como variable de respuesta. Al tratarse de un escenario ilustrativo, los resultados deberán confirmarse mediante corridas reales de validación antes de su implementación definitiva.



Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Modelo	3	4.30000	1.43333	68.01	0.000
Lineal	2	4.25000	2.12500	100.83	0.000
Velocidad	1	1.80000	1.80000	85.41	0.000
Presion	1	2.45000	2.45000	116.25	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.05000	0.05000	2.37	0.143
Velocidad*Presion	1	0.05000	0.05000	2.37	0.143
Error	16	0.33720	0.02108		
Total	19	4.63720			

Resumen del modelo

			R-cuadrado
			(pred)
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	
0.145172	92.73%	91.36%	88.64%

Limitación de linealidad y validación local:

El diseño factorial evalúa la respuesta en los niveles extremos de presión de 80 y 90 psi y no incorpora puntos centrales formales. Por tanto, no se realizó una prueba estadística de curvatura. La selección de 85 psi supone un comportamiento aproximadamente lineal dentro del rango estudiado. Esta suposición se evalúa posteriormente mediante la corrida piloto configurada en Velocidad Baja y 85 psi, cuya media observada de 15.008 lb-in es consistente con la predicción del modelo de 15.000 lb-in. La forma funcional deberá confirmarse mediante datos adicionales de planta.

Análisis de resultados y ecuación de regresión

El modelo factorial completo resultó estadísticamente significativo $p < 0.001$ y explicó 92.73% de la variación observada, con un R^2 ajustado de 91.36% y un R^2 de predicción de 88.64%. La Velocidad presentó un efecto estimado de 0.600 lb-in $p < 0.001$ y la Presión un efecto de 0.700 lb-in $p < 0.001$. La interacción Velocidad $\times$ Presión presentó un efecto reducido de 0.100 lb-in y la interacción no resultó significativa $p = 0.143$; no obstante, se conservó porque el análisis fue preespecificado como un modelo factorial completo y para mantener correspondencia directa entre el ANOVA, la ecuación y las predicciones presentadas.

El modelo se expresa en unidades codificadas mediante:

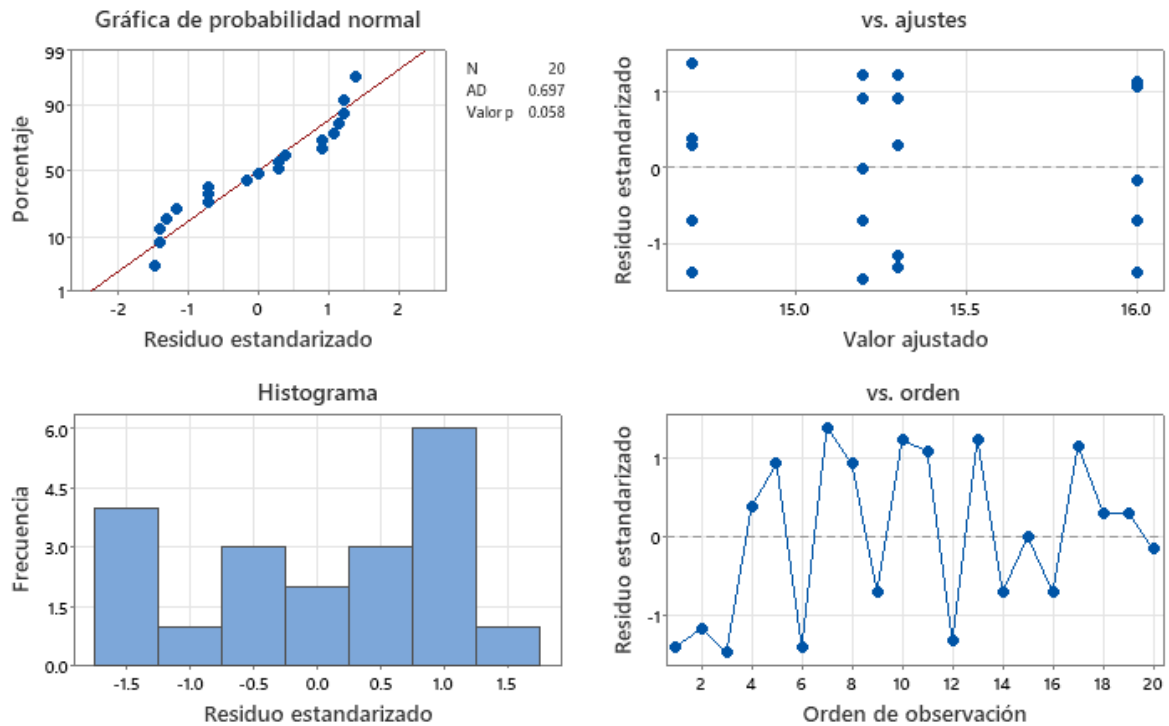
$$Torque = 15.300 + 0.300A + 0.350B + 0.050AB$$

donde $A = -1$ para Velocidad Baja, $A = +1$ para Velocidad Alta y

$B = (Presión - 85)/5$.

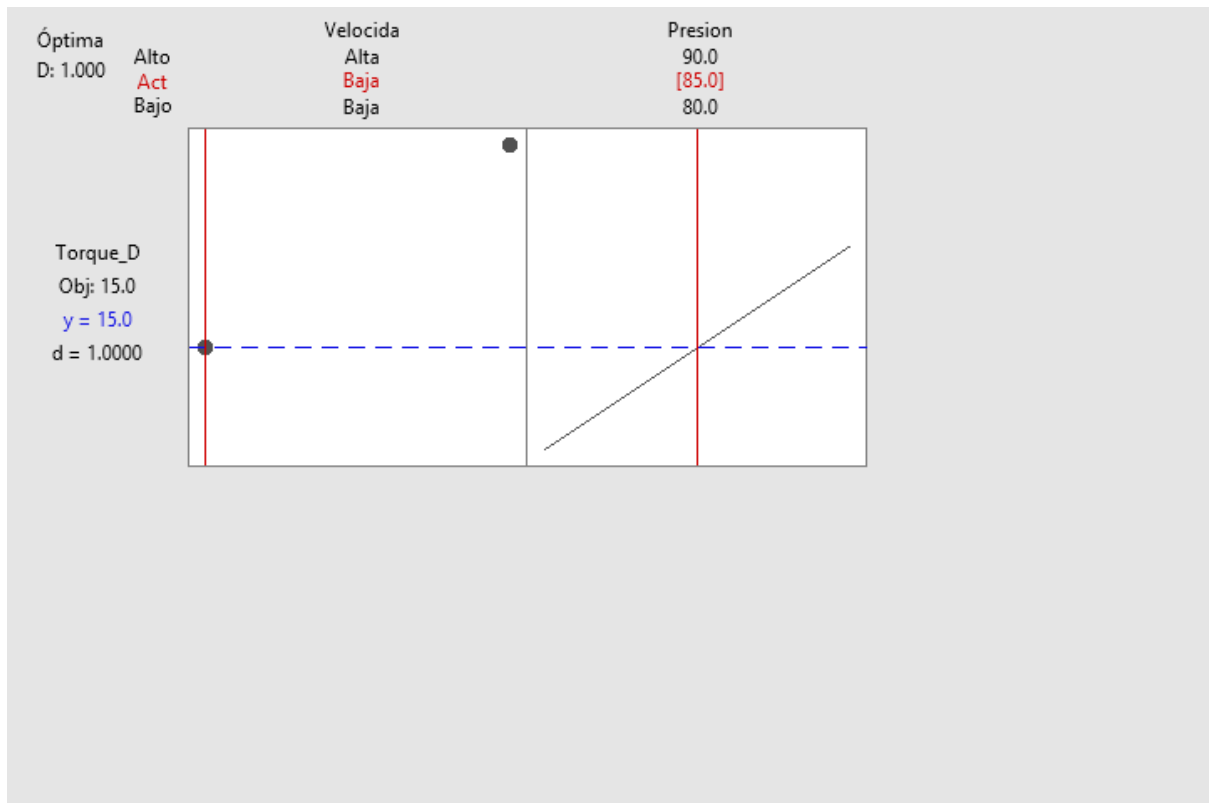
La prueba de Anderson-Darling produjo $p = 0.058$, por lo que no se rechaza el supuesto de normalidad de los residuos. Las gráficas de residuos contra ajustes y contra el orden de corrida no muestran patrones visuales evidentes de heterocedasticidad o dependencia temporal.

Gráficas de residuos para Torque_DOE



Optimización de Respuesta y Solución Propuesta

El Optimizador de Respuesta se configuró utilizando los límites de especificación de 14.0 y 16.0 lb-in y un objetivo nominal de 15.0 lb-in. La solución presentada constituye una configuración propuesta, pendiente de validación con datos de planta.



Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
Torque_DOE	Objetivo	14	15	16	1	1

Solución

Solución	Velocidad	Presion	Torque_DOE Deseabilidad	
			Ajuste	compuesta
1	Baja	85	15	1

Optimización de la respuesta: El Optimizador de Respuesta se configuró utilizando los límites de especificación del cliente —14.0 y 16.0 lb-in— y un objetivo nominal de 15.0 lb-in. La combinación que maximiza la deseabilidad es Velocidad Baja y Presión de 85 psi, con una respuesta ajustada de 15.000 lb-in y una deseabilidad compuesta de 1.000.

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración		
Velocidad	Baja		
Presion	85		
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95% IP de 95%
Torque_DOE	15.0000	0.0459	(14.9027, 15.0973) (14.6772, 15.3228)

Predicción en la configuración óptima: Para Velocidad Baja y Presión de 85 psi, el modelo predice una media de 15.000 lb-in. El intervalo de confianza de 95% para la respuesta media es [14.9027, 15.0973] y el intervalo de predicción individual de 95% es [14.6772, 15.3228]. Ambos intervalos permanecen dentro de las especificaciones de 14.0 a 16.0 lb-in.

Conclusión y Viabilidad de la Fase Mejora:

Al configurar la estación en Velocidad Baja y ajustar el regulador de presión a 85 psi y verificar la lectura mediante un manómetro calibrado, el modelo centra la respuesta proyectada en el objetivo de 15.0 lb-in. Para evitar sobreestimaciones, se corrigió el cálculo de capacidad original utilizando la desviación estándar implícita en el intervalo de predicción individual, obteniendo una capacidad predictiva teórica conservadora aproximada de 2.19, derivada del intervalo de predicción individual del modelo. Este valor no sustituye una evaluación formal de capacidad con datos sostenidos de producción y se utiliza únicamente como referencia previa a la corrida piloto. Esta proyección es consistente con los resultados de la corrida piloto ($C_{pk} = 1.97$).

Cálculo de referencia: Utilizando el intervalo de predicción individual de 95% [14.6772, 15.3228], una semiamplitud de 0.3228 lb-in y $t_{0.975,16} = 2.120$, se estimó una desviación predictiva conservadora de $0.3228/2.120 = 0.1523$ lb-in. Al encontrarse la predicción centrada en 15.000 lb-in, la capacidad predictiva aproximada es $1/[3(0.1523)] = 2.19$.

Resolución proyectada de la restricción de Tiempo de Ciclo:

Operar en Velocidad Baja incrementaría el tiempo individual de atornillado en 3 segundos. Para compensar este efecto, el diseño de mejora incorpora un balanceo de línea que transfiere la inspección visual a la estación AOI. Esta redistribución proyecta una reducción neta de 12 segundos en la estación de Ensamble Manual, obteniendo un tiempo de ciclo estimado de 48 segundos, inferior al Takt Time de 54 segundos. El balanceo y la absorción de actividades en AOI deberán confirmarse mediante un estudio de tiempos durante la validación en planta.

**DESGLOSE DETALLADO DE TIEMPOS DE CICLO (C/T):
PROYECTO DOE DE TORQUE + BALANCEO**

SUB-OPERACIÓN	LÍNEA BASE (VEL. ALTA)	ESTADO FUTURO (VEL. BAJA + BALANCEO)
Atornillado	15 s	18 s (+3s por baja velocidad)
Inspección	12 s	0 s (Trasladada a estación AOI)
Manejo pieza	33 s	30 s (Mejora ergonómica)
Ciclo Total	60 s	48 s

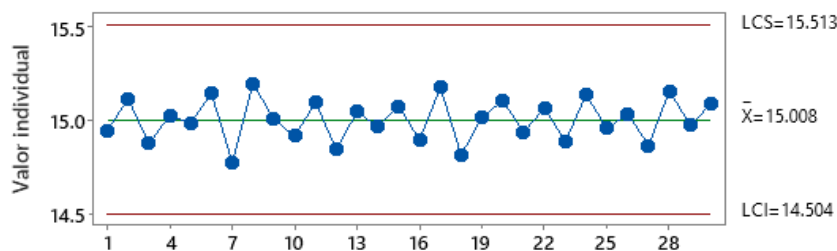
Supuesto de balanceo: De los 12 segundos de inspección retirados de la estación de Ensamble Manual, 5 segundos se incorporan como incremento neto al ciclo de AOI de 20 a 25 segundos . Los 7 segundos restantes se consideran absorbidos mediante ejecución automática o paralela dentro del ciclo existente de AOI. Este supuesto de diseño deberá verificarse mediante un estudio de tiempos durante la validación en planta.

5.1 Validación del Proceso — Corrida Piloto

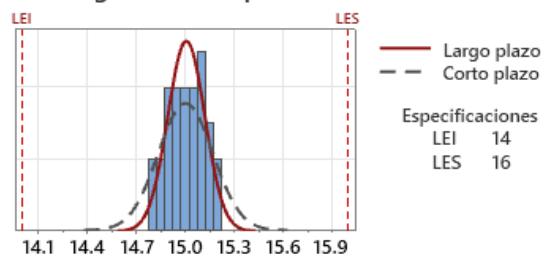
Para evaluar preliminarmente la configuración propuesta, se modeló una corrida piloto ilustrativa de 30 tarjetas PCBA bajo condiciones representativas de producción. La estación de Ensamble Manual se consideró configurada en Velocidad Baja y Presión de 85 psi, utilizando ayudas visuales como mecanismo inicial de estandarización. Estas ayudas no constituyen un bloqueo físico o poka-yoke; la solución definitiva propuesta deberá incorporar un mecanismo de control de acceso o bloqueo del selector de velocidad durante su validación en planta. Los resultados del torque fueron evaluados mediante un Capability Sixpack.

Informe del Capability Sixpack del proceso para Torque_Piloto

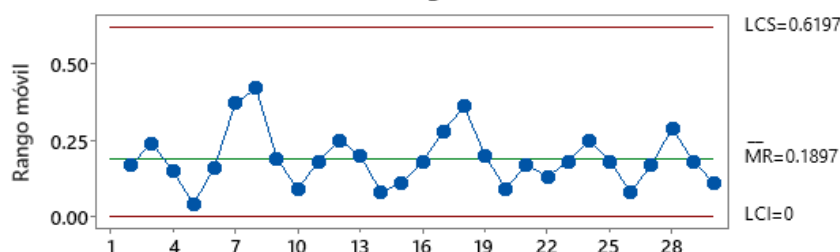
Gráfica I



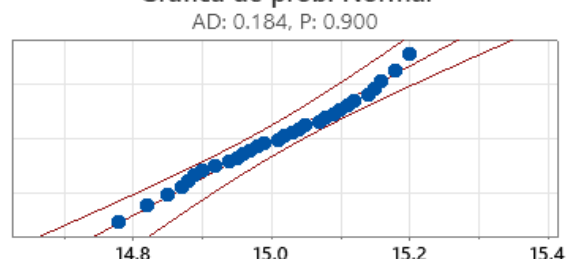
Histograma de capacidad



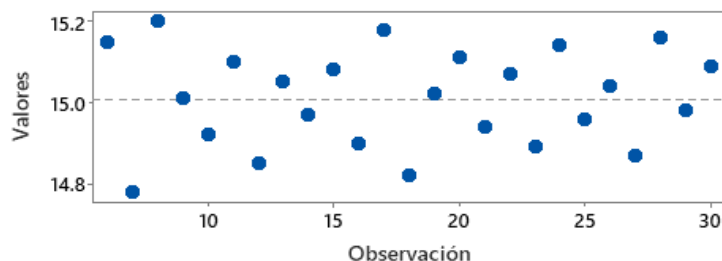
Gráfica de rangos móviles



Gráfica de prob. Normal



Últimas 25 observaciones



Gráfica de capacidad



La dispersión real del proceso es representada por 6 sigma.

Capacidad y estabilidad preliminares: La gráfica I-MR de la muestra piloto $N = 30$ no presentó puntos fuera de los límites de control bajo el Test 1 de Minitab. Sin embargo, la secuencia muestra una alternancia marcada entre observaciones altas y bajas, con una autocorrelación de primer orden aproximada de $r_1 = -0.736$. Por tanto, la independencia secuencial y la estabilidad del proceso no pueden considerarse demostradas con esta corrida.

La muestra presenta una media de 15.008 lb-in, un Cpk estimado de 1.97 y un Ppk estimado de 2.92. La diferencia atípica entre ambos índices es consistente con la sensibilidad de la estimación de corto plazo basada en rangos móviles ante el patrón alternante. Estos índices se conservan como resultados exploratorios de la muestra ilustrativa, pero no deberán interpretarse como capacidad definitiva de producción.

La configuración Velocidad Baja 85 psi permanece respaldada como confirmación local del valor medio predicho por el DOE 15.000 lb-in frente a 15.008 lb-in observado. No obstante, la validación definitiva deberá realizarse mediante una corrida independiente en orden temporal natural, distribuida entre turnos, lotes, operadores y condiciones reales de producción, aplicando pruebas adicionales para patrones no aleatorios.

Para caracterizar la capacidad sostenida se ampliará la muestra a más de 100 mediciones.

Para evaluar la meta de Scrap por Torque Alto inferior a 0.5%, se utilizará el criterio binomial definido en el Plan 30/60/90.

5.2 PFMEA de Proceso — Ensamble Manual PCBA y Controles Asociados

Escala utilizada: Severidad S, Ocurrencia O y Detección D se califican de 1 a 10. En Detección, 1 representa una probabilidad muy alta de detectar la falla antes de la liberación y 10 representa una probabilidad muy baja de detección. El NPR se calcula como $S \times O \times D$. La Severidad no se reduce después de las acciones cuando el efecto potencial sobre el cliente permanece sin cambio.

Campo	Valor	Campo	Valor
Número de PFMEA	PFMEA-PCBA-001	Revisión	0 — Propuesta
Proceso	Ensamble Manual PCBA y controles asociados	Process Owner	Supervisor de Ensamble
CTQ del producto	Torque de sujeción: 15.0 ± 1.0 lb-in	KPIV principales	Velocidad Baja / Presión objetivo: 85 psi
Equipo	Calidad, Producción, Mantenimiento, Ingeniería y Logística	Estado	Propuesto para validación en planta

Nota metodológica: Las evaluaciones de Severidad, Ocurrencia y Detección representan estimaciones preliminares del escenario ilustrativo. Deberán ser ratificadas por un equipo multifuncional utilizando datos reales de planta durante la fase PPAP.

N.º	Operación	Función / requisito	Modo potencial de falla	Efecto potencial	S	Causa potencial	O	Control preventivo documentado	Control de detección actual	D	NPR
1	Preparación de estación	Configurar la herramienta en Velocidad Baja	Selector colocado en Velocidad Alta	Incremento del torque, sobre-torque, daño en carcasa o PCBA y Scrap	8	Error de configuración, cambio de turno o ausencia de bloqueo	4	Instrucción de trabajo y ayuda visual no bloqueante	Verificación visual al inicio del turno	5	160
2	Preparación neumática	Ajustar la presión objetivo a 85 psi	Presión no ajustada al objetivo de 85 psi	Desplazamiento de la media de torque y pérdida de capacidad	8	Regulador sin bloqueo, manipulación accidental o variación de línea	5	Ajuste manual del regulador con objetivo de 85 psi documentado; sin bloqueo físico	Lectura del manómetro de línea	5	200
3	Medición de presión	Mostrar la presión real del proceso	Manómetro descalibrado o con lectura sesgada	La estación parezca operar a 85 psi aunque la presión real sea diferente	8	Calibración vencida, daño, error de cero o instalación incorrecta	3	No se documenta un programa de calibración del manómetro	Inspección visual del manómetro	7	168
4	Preparación de herramienta	Entregar torque de forma repetible	Herramienta o broca desgastada o desajustada	Variación excesiva y torque fuera de especificación	8	Desgaste, mantenimiento insuficiente o deriva de la herramienta	4	No se documenta mantenimiento preventivo por ciclos de uso	Inspección visual y auditoría de torque	6	192
5	Abastecimiento	Utilizar tornillería aprobada	Tornillo o lote incorrecto	Cambio de fricción, rosca dañada y torque anormal	7	Mezcla de materiales, lote no identificado o surtido incorrecto	3	Identificación de material e instrucción de surtido	Verificación visual del número de parts y lote contra BOM; pendiente de validar en planta	6	126
6	Posicionamiento	Alinear PCBA, carcasa y tornillo	Pieza desalineada o tornillo cruzado	Torque artificialmente alto, daño mecánico o ensamble incompleto	8	Método manual, fixture insuficiente o error del operador	3	Instrucción de ensamble y ayuda visual de posicionamiento	Inspección visual	4	96
7	Atornillado	Lograr torque de 15.0 ± 1.0 lb-in	Torque fuera de especificación	Producto no conforme, Scrap por Torque Alto o falla de sujeción	8	Variación residual de presión, velocidad, herramienta, material o método	4	Parámetros Baja y 85 psi propuestos propuesta	Auditoría de torque con torquímetro calibrado	6	192
8	Auditoría de torque	Medir el torque sin sesgo relevante	Técnica de medición inconsistente	Aceptación falsa, rechazo falso o datos de control incorrectos	7	Ángulo de medición, sujeción manual o método no estandarizado	3	Torquímetro calibrado y estudio Gage R&R	Revisión del resultado de medición	5	105
9	Transferencia a AOI	Mantener la cobertura de inspección trastrada	Inspección refirada de Ensamble pero no absorbida correctamente por AOI	Defectos visuales no detectados o incremento real del cielo	7	Programa AOI incompleto, tiempo insuficiente o transferencia no validada	4	Propuesta de balanceo de línea	No existe validación documentada de cobertura	6	168
10	Liberación de producto	No liberar producto ante una señal fuera de control	Pieza no conforme liberada	Producto no conforme enviado al proceso posterior o al cliente	8	No existe un criterio formal documentado de segregación y liberación	3	Revisión del operador	Registro manual de torque	7	168
11	Sistema Kanban / WIP	Respetar los límites del VSM Futuro	WIP superior al límite o tarjeta Kanban ausente	Aumento del Lead Time, sobreproducción y pérdida del flujo pull	5	Disciplina insuficiente, tarjetas faltantes o abastecimiento no regulado	5	Diseño del VSM Futuro	Supervisión visual sin auditoría formal	5	125
12	Cambio de turno	Transferir y verificar los parámetros	El turno entrante no verifica velocidad, presión o primera pieza	Inicio del turno bajo condiciones incorrectas	8	Comunicación verbal y ayuda visual; sin checklist documentado de transferencia	4	Comunicación verbal y ayuda visual	Verificación no documentada	6	192
13	Registro y trazabilidad	Conservar datos de torque y configuración	Registro incompleto, incorrecto o no trazable al lote	Imposibilidad de detectar deriva, investigar fallas o confirmar beneficios	6	Formato manual, omisión o identificación deficiente del lote	3	Registro de torque definido en el proceso	Revisión manual del formato	7	126

Acciones propuestas y evaluación del riesgo residual proyectado

Nota: Los valores residuales representan una estimación del riesgo esperado después de aplicar las acciones propuestas. Deberán recalcularse con evidencia objetiva de implementación y efectividad durante la validación en planta.

N.º	Acción recomendada	Responsable	Fecha objetivo	Evidencia esperada	S post.	O post.	D post.	NPR residual	Estado
1	Instalar un selector con llave, contraseña o bloqueo físico que mantenga la herramienta en Velocidad Baja; verificar la configuración mediante checklist en cada cambio de turno	Mantenimiento / Supervisor de Ensamble	Semana 13	Fotografía del bloqueo instalado y checklist aprobado	8	2	2	32	Propuesto
2	Instalar un regulador bloqueable; verificar el objetivo de 85 psi al inicio del turno, después de mantenimiento y cada 4 horas; definir y aprobar la tolerancia operativa durante PPAP	Mantenimiento / Ingeniería de Proceso	Semana 13	Registro de presión, evidencia del bloqueo y tolerancia aprobada durante PPAP	8	2	2	32	Propuesto
3	Incorporar el manómetro al programa de calibración; verificar cero, condición física y vigencia antes del uso	Calidad / Metrología	Semana 13	Certificado, etiqueta de calibración y registro de verificación	8	2	3	48	Propuesto
4	Establecer mantenimiento preventivo por ciclos de uso y una verificación funcional después de cada cambio de broca o intervención	Mantenimiento	Semana 14	Plan de mantenimiento y registros de verificación funcional	8	2	3	48	Propuesto
5	Implementar identificación de número de parte y lote, segregación de materiales y verificación contra BOM antes de liberar la tomillería a producción	Materiales / Calidad	Semana 14	Registro de lote, etiqueta de identificación y auditoría contra BOM	7	2	3	42	Propuesto
6	Incorporar un fixture o guía de posicionamiento y validar la primera pieza después de cada cambio de lote o ajuste de estación	Ingeniería de Proceso / Producción	Semana 14	Fixture aprobado y registro de liberación de primera pieza	8	2	2	32	Propuesto
7	Realizar aprobación inicial de 5 piezas y posteriormente medir subgrupos de 5 piezas cada 2 horas mediante gráfica X-R; detener y contener ante una señal fuera de control	Calidad / Supervisor de Ensamble	Semana 13	Carta de control, registros de medición y evidencia de reacción	8	2	3	48	Propuesto
8	Estandarizar postura, ángulo y secuencia de medición; capacitar operadores y repetir el Gage R&R después de cambios relevantes	Calidad / Capacitación	Semana 14	Instrucción visual, registros de capacitación y nuevo estudio Gage R&R	7	2	3	42	Propuesto
9	Validar el programa y la cobertura de AOI; realizar un estudio de tiempos para confirmar que los 7 segundos restantes del balanceo propuesto son absorbidos de forma automática o paralela	Ingeniería de Calidad / Ingeniería Industrial	Semana 14	Validación de cobertura AOI y estudio de tiempos aprobado	7	2	3	42	Propuesto
10	Establecer segregación física de producto no conforme y prohibir la liberación cuando exista una señal fuera de control o un registro incompleto	Calidad / Producción	Semana 13	Área de contención identificada y formato de liberación aprobado	8	1	2	16	Propuesto
11	Definir cantidades máximas por supermercado, utilizar tarjetas Kanban numeradas y realizar una auditoría diaria del WIP	Logística / Supervisor de Ensamble	Semana 15	Estándar Kanban, tarjetas numeradas y registro diario de WIP	5	2	2	20	Propuesto
12	Implementar un checklist de transferencia de turno que verifique velocidad, presión, instrumento de medición y liberación de primera pieza	Supervisor de Ensamble	Semana 13	Checklist firmado por los responsables de ambos turnos	8	2	2	32	Propuesto
13	Utilizar un registro controlado con fecha, turno, lote, operador, velocidad, presión y resultados de torque; realizar una auditoría semanal de integridad	Calidad / Ingeniería de Datos	Semana 15	Formato controlado y evidencia de auditoría de registros	6	2	2	24	Propuesto

Conclusión del PFMEA: La evaluación inicial identificó como riesgos prioritarios la configuración incorrecta de presión, la condición de la herramienta, el torque fuera de especificación, la transferencia de parámetros entre turnos y la liberación de producto. Las acciones propuestas priorizan controles preventivos —bloqueo de parámetros, mantenimiento, estandarización y gestión de materiales— complementados con controles de detección, trazabilidad y reacción. Los NPR residuales son proyecciones y deberán recalcularse después de implementar las acciones y verificar su efectividad con datos reales de planta.

Criterio de cierre: Ninguna acción se considerará cerrada únicamente por estar documentada. El cierre requerirá evidencia objetiva de implementación, responsable identificado, fecha real de cumplimiento y verificación de efectividad.

5.3 Plan de Control de Producción — Propuesto para Validación en Planta

Campo	Valor	Campo	Valor
Número de Plan	CP-PCBA-001	Revisión	0 — Propuesta
Número de parte	Por confirmar durante PPAP	Cliente	OEM
Proceso	Ensamble Manual PCBA y controles asociados	Process Owner	Supervisor de Ensamble
CTQ del producto	Torque de sujeción: 15.0 ± 1.0 lb-in	KPIV principales	Velocidad Baja / Presión objetivo 85 psi
Estado	Propuesto para validación en planta	Aprobaciones requeridas	Calidad / Producción / Ingeniería / Champion

Nota metodológica: Este Plan de Control se deriva del PFMEA de proceso y representa una propuesta para validación durante PPAP. Los límites de control estadístico y la tolerancia operativa de presión deberán establecerse con datos reales del proceso. Los límites de especificación de torque —14.0 y 16.0 lb-in— no deben utilizarse como sustituto de los límites de control.

N.º	Operación	Máquina / dispositivo	Característica	Tipo	Especificación / criterio	Método de evaluación	Muestra	Frecuencia	Método de control	Responsable	Registro	Reacción	PFMEA
1	Preparación de estación	Atornillador neumático y selector	Velocidad de herramienta	KPIV	Velocidad Baja; selector bloqueado	Inspección visual y verificación del bloqueo	1 setup	Inicio de turno, cambio de turno y después de mantenimiento	Bloqueo físico y checklist de setup	Supervisor / Mantenimiento	CK-SETUP	R1	1
2	Preparación neumática	Regulador y manómetro de línea	Presión de aire	KPIV	Objetivo 85 psi; tolerancia operativa pendiente de aprobación durante PPAP	Lectura con manómetro calibrado	1 lectura	Inicio de turno, después de mantenimiento y cada 4 horas	Regulador bloqueable y checklist	Supervisor / Mantenimiento	FR-PRES	R2	2
3	Verificación metrológica	Manómetro de línea	Estado de calibración	MSA	Calibración vigente, cero y condición física aceptables	Revisión de etiqueta, certificado y comprobación de cero	1 instrumento	Antes del uso y conforme al programa metrológico	Programa de calibración y verificación previa	Calidad / Metrología	CAL-MAN	R3	3
4	Preparación de herramienta	Atornillador neumático y broca	Condición funcional de la herramienta	Proceso	Sin daño o desgaste visible; funcionamiento aprobado	Inspección visual y verificación funcional	1 herramienta	Inicio de turno, cambio de broca y mantenimiento por ciclos	Plan de mantenimiento preventivo	Mantenimiento	PM-TOOL	R4	4
5	Abastecimiento	Contenedor de tornillería	Número de parte y lote	Proceso	Material aprobado contra BOM y lote trazable	Verificación visual o código contra BOM	100% de contenedores	Cada lote y cada reabastecimiento	Identificación, segregación y liberación de material	Materiales / Calidad	MAT-LOT	R5	5
6	Posicionamiento	Fixture o guía de ensamble	Alineación de PCBA, carcasa y tornillo	Proceso	Sin desalineación ni tornillo cruzado	Inspección visual y uso del fixture	5 piezas	Inicio de turno, cambio de lote o ajuste de estación	Aprobación de primera pieza	Producción / Calidad	FAI-PCBA	R5	6
7	Atornillado	Atornillador neumático y torquímetro digital	Torque de sujeción	CTQ	14.0–16.0 lb-in; objetivo 15.0 lb-in; límites X-barra-R pendientes de PPAP	Torquímetro digital calibrado	5 piezas iniciales y subgrupos de 5	Inicio de turno, cambio de lote, mantenimiento y cada 2 horas	Aprobación de primera pieza y gráfica X-barra-R	Calidad / Supervisor	SPC-TQ	R6/R7	7
8	Sistema de medición	Torquímetro digital y operador	Técnica y aptitud del sistema	MSA	Instrumento calibrado y operador autorizado; repetir Gage R&R después de cambios relevantes	Auditoría de técnica y estudio Gage R&R	100% de operadores autorizados	Calificación inicial y después de cambios de método o instrumento	Capacitación, certificación y MSA	Calidad / Capacitación	MSA-TQ	R3	8
9	Transferencia a AOI	Equipo y programa AOI	Cobertura de inspección y tiempo de ciclo	Proceso	Programa aprobado; C/T objetivo 25 s; absorción paralela de 7 s validada	Auditoría del programa y estudio de tiempos	1 estudio aprobado	Liberación inicial, cambio de programa o revisión de ingeniería	Control de cambios y validación AOI	Ingeniería de Calidad / Industrial	AOI-VAL	R8	9
10	Liberación de producto	Área de contención y sistema de estatus	Estado de aceptación	Producto	Solo producto conforme y con registro completo puede liberarse	Verificación de etiqueta o estatus electrónico	100% de lotes o contenedores	Cada liberación	Segregación física y autorización de Calidad	Calidad / Producción	REL-PCBA	R9	10
11	Sistema Kanban / WIP	Supermercado y tarjetas Kanban	Nivel de WIP	Proceso	Máximo 30 piezas en el supermercado designado y tarjetas completas	Conteo físico y revisión de tarjetas	100% del supermercado	Diariamente y en cada reabastecimiento	Gestión visual y auditoría de WIP	Logística / Supervisor	WIP-KB	R10	11
12	Cambio de turno	Checklist de transferencia	Verificación de parámetros	Proceso	Velocidad Baja, presión objetivo 85 psi, instrumento vigente y primera pieza liberada	Checklist firmado	1 checklist	Cada cambio de turno	Auditoría escalonada del proceso	Supervisor de Ensamble	CK-TURNO	R1/R2/R6	12
13	Registro y trazabilidad	Formato controlado o sistema digital	Integridad del registro	Proceso	Fecha, turno, lote, operador, velocidad, presión y torque completos	Auditoría del registro	100% de subgrupos y lotes	Cada subgrupo y lote; auditoría semanal	Formato controlado y revisión de integridad	Calidad / Ingeniería de Datos	TRZ-PCBA	R11	13

Nota de control documental: En caso de discrepancia entre la tabla gráfica y los planes de reacción textuales, prevalece la versión textual de este reporte. Para la técnica de medición o un MSA no conforme aplica el plan R12. La absorción automática o paralela de los 7 segundos trasladados a AOI permanece pendiente de validación mediante un estudio de tiempos.

Planes de reacción estandarizados

R1 — Velocidad incorrecta: Detener la operación, configurar Velocidad Baja, verificar el bloqueo, contener las piezas producidas desde la última verificación válida y liberar nuevamente cinco primeras piezas conformes.

R2 — Presión incorrecta: Detener la estación, ajustar el regulador al valor aprobado, inspeccionar la línea neumática y el manómetro, contener desde la última lectura conforme y liberar cinco primeras piezas.

R3 — Instrumento no conforme: Retirar el instrumento de servicio, sustituirlo por uno calibrado, evaluar las mediciones realizadas desde la última condición válida y repetir las mediciones afectadas cuando sea posible.

R4 — Herramienta o broca no conforme: Detener la operación, reparar o sustituir la herramienta, verificar su funcionamiento y aprobar cinco primeras piezas antes del reinicio.

R5 — Material o posicionamiento incorrecto: Segregar el material y las piezas afectadas, corregir el lote o posicionamiento, reinspeccionar y liberar únicamente producto conforme.

R6 — Torque fuera de especificación: Si cualquier unidad queda fuera de 14.0–16.0 lb-in, detener la estación, contener desde la última verificación conforme, comprobar velocidad, presión, herramienta, material y método, corregir la causa y liberar cinco piezas consecutivas conformes.

R7 — Señal fuera de control: Ante una señal en la gráfica $\bar{X}$ -R, detener o pausar la liberación, contener desde el último subgrupo estable, investigar la causa especial y obtener un nuevo subgrupo de cinco piezas dentro de control antes del reinicio. Los límites de control se calcularán durante PPAP y no serán iguales a los límites de especificación.

R8 — AOI no validado: Detener la liberación, regresar al programa aprobado, contener desde la última verificación válida y reinspeccionar el producto potencialmente afectado.

R9 — Liberación no autorizada: Bloquear el lote, trasladarlo al área de cuarentena y solicitar disposición formal de Calidad.

R10 — WIP superior al límite: Detener el reabastecimiento o el proceso que genera sobreproducción, restaurar el máximo de 30 piezas e investigar la causa del incumplimiento.

R11 — Registro incompleto: Suspender la liberación del lote hasta completar, verificar y aprobar la trazabilidad requerida.

R12 — Técnica de medición o MSA no conforme: Suspender temporalmente la autorización del operador o del método afectado, verificar el estado de calibración del instrumento, revisar la postura, el ángulo y la secuencia de medición, ejecutar reentrenamiento y repetir la evaluación del sistema de medición antes de autorizar nuevamente su uso.

5.4 Matriz de Capacitación y Certificación de Competencias

Objetivo: Asegurar que todo el personal involucrado en los controles críticos posea la competencia necesaria antes de operar, medir, mantener o liberar producto bajo la configuración propuesta. Las competencias y autorizaciones deberán confirmarse durante PPAP.

N.º	Rol / puesto	Competencias requeridas	Controles vinculados	Método de capacitación	Evaluación práctica	Criterio de aprobación	Responsable de capacitar	Frecuencia / disparador	Evidencia / estado
1	Operador de Ensamble	Configurar Velocidad Baja, verificar presión objetivo de 85 psi, posicionar componentes, ejecutar atornillado y aplicar R1, R2, R5 y R6	CK-SETUP, FR-PRES, FAI-PCBA, SPC-TQ	Instrucción de trabajo, demostración y práctica supervisada	Configurar la estación y producir cinco piezas consecutivas dentro de 14.0–16.0 lb-in	Ejecución correcta sin omitir pasos críticos y cinco piezas conformes	Supervisor de Ensamble / Calidad	Antes de operar; después de cambio de método o resultado no conforme	Registro de capacitación y autorización — Propuesto
2	Supervisor de Ensamble	Verificar setup, checklist de turno, primera pieza, SPC y planes R1, R2, R6 y R7	CK-SETUP, CK-TURNO, SPC-TQ	Taller práctico y simulación de escenarios	Interpretar una señal simulada de X-barra-R y ejecutar el plan de reacción	Identificación correcta de la señal, contención y liberación documentada	Ingeniería de Calidad	Capacitación inicial y recertificación anual o después de cambios	Checklist de competencia — Propuesto
3	Inspector de Calidad	Medición de torque, liberación, segregación, gráfica X-barra-R y trazabilidad	SPC-TQ, REL-PCBA, TRZ-PCBA	Entrenamiento técnico y práctica con torquimetro	Medir un subgrupo, registrar resultados y ejecutar R6/R7/R9	Mediciones completas, registro correcto y reacción adecuada	Ingeniería de Calidad / Metrología	Antes de autorización y después de cambio de instrumento o método	Certificación de inspector — Propuesto
4	Personal de Mantenimiento	Bloqueo de velocidad, ajuste de presión, inspección neumática y mantenimiento por ciclos	CK-SETUP, FR-PRES, PM-TOOL	Capacitación técnica y demostración en equipo	Configurar y bloquear la estación; verificar herramienta y presión	Setup correcto, instrumentos vigentes y registro completo	Ingeniería de Proceso / Metrología	Inicial, después de modificación y según plan de mantenimiento	Registro técnico de competencia — Propuesto
5	Personal de Metrología	Calibración, comprobación de cero, evaluación de instrumento fuera de calibración y R3	CAL-MAN, MSA-TQ	Procedimiento metrológico y estudio de casos	Revisar un instrumento y documentar la metrológica	Certificado, etiqueta y evaluación de impacto correctamente emitidos	Responsable de Metrología	Conforme al sistema metrológico y cambios de instrumento	Expediente de calibración — Propuesto
6	Materiales / Logística	Verificación de número de parte y lote, segregación, Kanban y máximo de WIP	MAT-LOT, WIP-KB	Capacitación visual y recorrido de proceso	Verificar un lote y auditar el supermercado	Material correcto y WIP no mayor de 30 piezas	Calidad / Ingeniería Logística	Inicial, cambio de material o modificación del Kanban	Registro de capacitación — Propuesto
7	Ingeniería de Calidad / AOI	Validar cobertura AOI, control de cambios, C/T de 25 s y absorción propuesta de 7 s	AOI-VAL	Revisión técnica, prueba de programa y estudio de tiempos	Ejecutar validación de cobertura y documentar el ciclo	Programa aprobado y estudio de tiempos firmado	Ingeniería de Calidad / Industrial	En liberación inicial y después de cambio de programa	Reporte AOI y estudio de tiempos — Propuesto
8	Ingeniería de Proceso / Datos	Auditar registros, indicadores, integridad de datos y seguimiento de capacidad	TRZ-PCBA, SPC-TQ, WIP-KB	Capacitación en formatos, SPC y auditoría de datos	Auditar un lote completo y emitir un reporte de desviaciones	Trazabilidad completa y reporte sin omisiones	Process Owner / Ingeniería de Calidad	Inicial y cuando cambien formatos o sistemas	Registro de autorización — Propuesto

5.5 Acta de Transferencia al Process Owner

Objetivo: Formalizar la entrega documental y la responsabilidad propuesta de sostenimiento del proceso al Supervisor de Ensamble, sin implicar que las acciones hayan sido implementadas o validadas físicamente. La transferencia definitiva estará condicionada a la aprobación de PPAP, capacitación del personal, cierre de acciones del PFMEA y aceptación del Plan de Control.

METADATOS DEL PROYECTO (DMAIC)

Campo	Valor
Proyecto	Reducción del Lead Time y del Scrap por Torque Alto
Acta	AT-PCBA-001
Process Owner	Supervisor de Ensamble
Estado	Transferencia propuesta

Campo	Valor
Champion	Gerente de Operaciones
Fecha	Pendiente de aprobación
Green Belt	Jehu Lara Corona
Revisión	0 — Propuesta

TABLA DE ENTREGABLES TRANSFERIDOS

ENTREGABLES DEL PROYECTO DMAIC

N.º	Entregable transferido	Responsable futuro	Criterio de aceptación	Estado / pendiente
1	Project Charter y definición del alcance	Champion / Process Owner	Objetivos, alcance y métricas aprobados	Propuesto
2	Configuración propuesta Baja-85 psi	Ingeniería de Proceso	Tolerancia de presión aprobada mediante PPAP	Pendiente de validación
3	PFMEA de proceso	Equipo multifuncional	Calificaciones ratificadas y acciones con evidencia	Pendiente de implementación
4	Plan de Control	Process Owner / Calidad	Registros, frecuencias y planes de reacción aprobados	Propuesto
5	Planes de reacción	Supervisor / Calidad	Personal capacitado y simulaciones aprobadas	Pendiente de capacitación
6	Matriz de capacitación	Supervisor / Recursos Humanos	Personal competente y autorizado	Pendiente de ejecución
7	Programa de calibración	Metrología	Instrumentos vigentes y trazables	Pendiente de confirmación
8	Validación AOI e ingeniería de tiempos	Ingeniería de Calidad / Industrial	Cobertura y C/T de 25 s demostrados	Pendiente de estudio
9	Sistema Kanban y límite de WIP	Logística / Producción	Máximo de 30 piezas sostenido	Pendiente de validación
10	Plan de seguimiento 30/60/90	Process Owner / Green Belt	Revisiones y evidencias programadas	Propuesto
11	Modelo de validación financiera	Finanzas / Champion	Ahorro validado con datos de 90 días	Pendiente
12	Archivos de datos y Minitab	Calidad / Ingeniería de Datos	Archivos completos y reproducibles	Preparado para transferencia

Nota: Los entregables se han estructurado para su transferencia y seguimiento.

Aclaración de estado: El término “entregables transferidos” identifica el paquete preparado para transferencia. Ningún entregable se considerará formalmente recibido, aprobado o implementado hasta completar las firmas, fechas y criterios de aceptación correspondientes.

Función	Nombre / cargo	Aceptación	Fecha
Green Belt	Jehu Lara Corona	Elaboró	Pendiente
Process Owner	Supervisor de Ensamble	Recibe	Pendiente
Champion	Gerente de Operaciones	Autoriza	Pendiente
Calidad	Responsable de Calidad	Verifica	Pendiente
Finanzas	Responsable financiero	Valida beneficios	Pendiente

5.6 Plan de Seguimiento y Verificación 30/60/90

El seguimiento 30/60/90 tiene como finalidad separar la validación técnica, operativa y financiera del proyecto. Ningún beneficio se considerará validado antes de completar los criterios aplicables y obtener la aprobación del Process Owner, Calidad, Finanzas y Champion.

PLAN DE REVISIÓN Y SOSTENIMIENTO

Metodología: Lean Six Sigma (Fase de Control)

Horizonte	Objetivo de revisión	Datos mínimos	Indicadores y criterios	Acción ante incumplimiento	Responsable	Evidencia
30 días	Confirmar implementación básica y disciplina de control	Mínimo 100 mediciones de torque, al menos 2 turnos y 2 lotes	Setup documentado 100%; instrumentos vigentes; proceso estable; Cpk preliminar ≥ 1.33 si se cumplen los supuestos; ciclo ≤ 54 s; WIP del supermercado ≤ 30 piezas	Aplicar planes de reacción, reentrenar, revisar setup, instrumento y método	Process Owner / Calidad	Reporte de 30 días, cartas de control y auditorías
60 días	Verificar sostenimiento entre turnos y lotes	Mínimo 300 mediciones acumuladas, múltiples lotes y turnos	Sin causas especiales abiertas; Cpk ≥ 1.33 ; Lead Time promedio ≤ 8.0 días; cumplimiento del Plan de Control $\geq 95\%$; capacitación 100%	Reabrir PFMEA, modificar controles, aumentar muestreo y escalar al Champion	Process Owner / Green Belt	Reporte de 60 días y PFMEA actualizado
90 días	Validar resultados finales y beneficio financiero	Mínimo 598 unidades inspeccionadas para la validación de Scrap, además de datos sostenidos de capacidad	Scrap por Torque Alto $< 0.5\%$ con evidencia estadística; Cpk ≥ 1.33 estable; Lead Time ≤ 8.0 días; objetivo de diseño 4.06 días evaluado; ahorro financiero validado	No cerrar el proyecto; ampliar observación, revisar causas y recalcular beneficio	Champion / Finanzas / Process Owner	Acta de revisión de 90 días y validación financiera

Criterio para la tasa de Scrap: La referencia de 598 unidades corresponde al caso de cero defectos observados, bajo independencia y confianza unilateral de 95%. Si se presenta uno o más defectos, deberá calcularse el límite superior binomial exacto correspondiente; no se podrá afirmar automáticamente el cumplimiento de la meta de 0.5%. Las unidades empleadas para la validación deberán distribuirse entre días, turnos, lotes, operadores y condiciones representativas de producción; no se aceptará una única corrida concentrada como evidencia de sostenimiento a 90 días.

$$Ahorro_{\text{anualizado}} = (0.031 - p_{\text{observada}})(V_{\text{anual validado}})(C_{\text{unitario validado}})$$

$$ROI_{\text{validado}} = \frac{Ahorro_{\text{anualizado}} - 9,120}{9,120} \times 100$$

El costo unitario de \$6.08 USD, el volumen anual y la tasa posterior deberán ser confirmados por Finanzas. El beneficio de WIP continuará excluido del ROI y se registrará, cuando corresponda, como liberación no recurrente de capital de trabajo.

Cierre Financiero y Operativo del Proyecto — Proyección

La aplicación de la metodología DMAiC al conjunto de datos ilustrativo permitió desarrollar y evaluar una propuesta técnicamente estructurada para atender el Lead Time y el Scrap atribuible a Torque Alto en la línea de ensamble PCBA. Los resultados representan proyecciones de diseño y deberán confirmarse mediante PPAP, corridas de validación y seguimiento sostenido con datos reales de planta.

Optimización del Lead Time: El diseño del sistema Pull, los supermercados regulados, la gestión de Kanban y el balanceo de la estación proyectan una reducción del Lead Time de 13.5 a 4.06 días. El objetivo contractual del proyecto se considerará cumplido si el Lead Time validado permanece por debajo de 8.0 días; el valor de 4.06 días deberá tratarse como objetivo de diseño hasta su confirmación operativa.

Mejora del CTQ de torque: El DOE identifica Velocidad Baja y una presión objetivo de 85 psi como la configuración propuesta para centrar la respuesta en 15.0 lb-in. La corrida piloto ilustrativa produjo una media de 15.008 lb-in, consistente con la predicción del modelo. Los índices $C_{pk} = 1.97$ y $P_{pk} = 2.92$ se consideran resultados exploratorios debido al patrón alternante identificado; la capacidad y estabilidad definitivas deberán confirmarse mediante una corrida independiente distribuida entre turnos, lotes, operadores y condiciones reales de operación.

Reducción del Scrap: El proyecto busca reducir el componente de Scrap atribuible a Torque Alto desde una línea base estimada de 3.1% hasta menos de 0.5%. El cumplimiento deberá demostrarse mediante el seguimiento estadístico definido en el plan 30/60/90 y no se inferirá únicamente a partir del Cpk del piloto.

Impacto financiero: Al alcanzar la meta de 0.5%, el modelo proyecta un ahorro directo anual de \$19,760 USD y un ROI de 116.7%, con un ahorro potencial máximo de hasta \$23,560 USD si los defectos por Torque Alto se aproximaran a cero. Estos beneficios estarán sujetos a validación financiera con datos reales de producción durante el seguimiento de 90 días.

Transferencia y sostenimiento: El PFMEA, el Plan de Control, los planes de reacción, la Matriz de Capacitación y el Plan de Seguimiento se presentan como mecanismos propuestos para prevenir la regresión del proceso. La transferencia definitiva al Process Owner dependerá del cierre documentado de las acciones, la capacitación del personal y la aprobación del Champion, Calidad y Finanzas. Este reporte se entrega como propuesta técnica para evaluación y eventual implementación controlada. No constituye evidencia de que los resultados operativos o financieros hayan sido alcanzados físicamente.

Paquete electrónico de evidencia

El reporte técnico se complementa con el proyecto de Minitab y las hojas de trabajo utilizadas para los análisis de sistema de medición, capacidad inicial, ANOVA, DOE y corrida piloto. Estos archivos deberán conservarse junto con el PDF para permitir la reproducción de los resultados estadísticos presentados.

Estado del paquete: Preparado para revisión documental y transferencia condicionada.

Responsable de custodia propuesto: Calidad / Ingeniería de Datos.

Validación definitiva: Pendiente de datos físicos de planta y aprobación de PPAP.