Propuesta de mejora del proceso de ensamble de adaptadores SMA en medidores de telemetría para reducir fallas de transmisión a través de las herramientas de Lean Six Sigma: caso BTP Medidores y Accesorios S.A.S.

Brayan Stiven Cardenas Guataquira

Diego Alejandro Fernández Peña

Universitaria Agustiniana – UNIAGUSTINIANA

Facultad de ingeniera

Programa de Ingeniería Industrial

Bogotá D.C.

2025

Propuesta de mejora del proceso de ensamble de adaptadores SMA en medidores de telemetría para reducir fallas de transmisión a través de las herramientas de lean six sigma: caso BTP Medidores y Accesorios S.A.S.

Brayan Stiven Cardenas Guataquira

Diego Alejandro Fernández Peña

Tutor

Jairo Orlando Dueñas Guerra

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Industrial

Universitaria Agustiniana – UNIAGUSTINIANA

Facultad de ingeniera

Programa de Ingeniería Industrial

Bogotá D.C.

2025

Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para continuar cada día con determinación.

A mi familia, quienes con su amor, apoyo incondicional y palabras de aliento han sido la base fundamental de este logro.

A mis docentes y compañeros, por su guía y colaboración en este proceso de aprendizaje que hoy se ve reflejado en este proyecto.

Y, finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que creen en la mejora continua y en la innovación como herramientas para construir un futuro más eficiente y sostenible.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Dios, por brindarnos la fortaleza, la claridad y la constancia necesarias para culminar con éxito este proyecto. A nuestras familias, quienes, con su apoyo incondicional, paciencia y comprensión han sido un pilar fundamental durante este proceso de formación académica y personal.

A la Universitaria Agustiniana – UNIAGUSTINIANA, por ofrecernos los conocimientos, espacios y herramientas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo. De manera especial, agradecemos al docente Jairo Orlando Dueñas Guerra, por su guía, acompañamiento y valiosas orientaciones que enriquecieron este proyecto de investigación.

Asimismo, extendemos un reconocimiento a la empresa BTP Medidores y Accesorios S.A.S., por permitirnos acercarnos a su entorno productivo y brindarnos la información necesaria para llevar a cabo esta propuesta de mejora.

Finalmente, a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este anteproyecto, les expresamos nuestro más profundo agradecimiento.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1 1

Introducción 1

Generalidades 2

Información medidores 2

Identificación de Fallas. 3

Justificación 4

Objetivos. 5

Objetivo general. 5

Objetivos específicos. 5

Capítulo 2 7

Marco teórico. 7

Ensamble y calidad del conector SMA 7

Antecedentes nacionales e internacionales 7

Ensamble de conectores eléctricos 8

Importancia del torque en los procesos de ensamble 8

Marco conceptual. 9

Telemetría 9

Medidores inteligentes 9

Conector SMA 9

Falla de transmisión 10

Ensamble de componentes 10

Calidad del proceso 10

Capítulo 3 11

VOC (voz del cliente). 11

KPI. 13

Paretto 14

Análisis de frecuencia 15

Medidas de tendencia central y dispersión. 16

Diagrama de control. 17

Poka Yoke 18

SOP (Procedimiento Operativo Estándar) 20

Dashboard 23

CTQ (Critical to Quality). 24

Costo Beneficio. 26

Recomendaciones 27

Conclusiones 29

Referencia 31

Lista de figuras

Figura 1 *Torre 11 piso 3, antenas mal instaladas* 3

Figura 2 *Evidencia en terreno* 4

Figura 3 *VOC (Voz del cliente)* 11

Figura 4 *SIPOC* 12

Figura 5 *KPI (Indicador)* 13

Figura 6 *Paretto* 14

Figura 7 *Diagrama de control* 17

Figura 8 *Plano de base de instalación antena* 18

Figura 9 *Poka-Yoke para la instalación del conector SMA* 19

Figura 10 *Trazabilidad medidores Mosquera hasta el mes de junio* 23

Figura 11 *Trazabilidad medidores Mosquera hasta el mes de septiembre* 23

Figura 12 *Costo beneficio.* 26

Lista de tablas

Tabla 1 *Información medidores* 2

Tabla 2 *Análisis de frecuencia* 15

Tabla 3 *Medidas de tendencia central* 16

Tabla 4 *Medidas de dispersión* 17

Tabla 5 *SOP (Procedimiento Operativo Estándar)* 20

Tabla 6 *Procesos críticos.* 24

Capítulo 1

Introducción

Aquaforjas, hoy conocida como BTP Medidores y Accesorios S.A.S., es una empresa colombiana dedicada a la fabricación de medidores de agua y componentes hidráulicos en bronce, cobre y aluminio, así como al desarrollo de soluciones tecnológicas para acueductos, incluyendo estaciones inteligentes, sistemas de telemetría y software de gestión de fugas. Cuenta con un laboratorio acreditado para la calibración de medidores, ofrece servicios de instalación, mantenimiento y capacitación técnica, y facilita esquemas de financiamiento para entidades públicas. Con más de 60 años de trayectoria, es líder en Latinoamérica en tecnologías para la medición y control del agua.

Se encuentra ubicada en Calle 18B No. 65B-75, barrio Salitre Sur-Oriental, Puente Aranda, Bogotá D.C., Colombia. Allí funcionan tanto su planta de fabricación e implementación de soluciones como el laboratorio de calibración acreditado por la ONAC bajo la referencia 13-LAC-036 (ONAC, 2014), y reporta actualmente 78 trabajadores a su disposición.

Aquaforjas, a través de BTP Medidores y Accesorios, está estrechamente vinculada a la telemetría mediante el diseño e implementación de medidores de agua inteligentes con tecnologías de comunicación remota como radiofrecuencia, GPRS, LoRa y NB-IoT, además de sistemas AMI/AMR para la lectura automatizada del consumo. Complementa esto con una plataforma en la nube para monitoreo y análisis en tiempo real, facilitando la detección de fugas, fraudes y consumos anómalos. También integra tecnología satelital para identificar fugas subterráneas y ofrece servicios de consultoría, instalación y capacitación, posicionándose como un referente en soluciones de telemetría para el sector hídrico en Colombia.

Generalidades

En la actualidad, la compañía enfrenta una problemática que hace referencia a las fallas presentadas en la transmisión de datos por parte de los medidores de telemetría que ya se han establecido en terreno, para ser más exactos aquellos que están ubicados en el municipio de Mosquera.

Esta problemática afecta y dificulta el monitoreo y la recolección oportuna de información crítica para la gestión de comunicación, emitiendo alertas por perdidas de transmisión. Adherido a este proceso se proyecta un diagnóstico, donde se realiza una revisión técnica en campo, con el fin de lograr identificar y localizar los dispositivos con anomalías para así prever las posibles causas de la falla. En este desarrollo, se clasifican los dispositivos en dos grupos: Tx OK, correspondiente a medidores que actualmente emiten señal e información en tiempo real, y NO Tx, aquellos que presentan alertas por ausencia de transmisión. Esta inspección permite establecer un panorama claro de las condiciones de funcionamiento de los equipos y orientar acciones correctivas para mejorar la confiabilidad del sistema de telemetría

Información medidores

Tabla 1

Información medidores

Serial	EUI	Código	Dirección
23023495	8773cc4483eea739	49218	CL 12 6 ESTE 46 TO 5 APTO 302

Nota: Elaboración propia (2025).

La tabla ilustra los datos básicos del medidor instalado en terreno, incorporando su número de serie, EUI que hace referencia a un identificador único y código interno de la compañía, por último, dirección exacta de instalación. información necesaria para la trazabilidad del dispositivo y trámite durante el proceso de diagnóstico y mantenimiento.

Identificación de Fallas.

Figura 1

Torre 11 piso 3, antenas mal instaladas



Nota: Elaboración propia (2025).

En la imagen se presenta un nicho de medidores, donde se evidencian errores en la instalación de las antenas, las cuales se encuentran en una orientación inadecuada y posible interferencia entre dispositivos.

Se asocian las posibles causas por las cuales la comunicación no funciona de manera correcta en los dispositivos de medición de agua asociados con la telemetría.

- Estos casos evidenciados con respecto a las antenas mal ubicadas y sueltas causan que al momento de transmitir el medidor no logre comunicarse con el Gateway y por ende presenta falla de transmisión y no registra su consumo
- Otra observación que se evidencio es que el ajuste del adaptador SMA no se encontraba del todo fijo y por ende al realizar la instalación de la antena se desajustaba, lo que causo que se reventara el conector que comunica a través de la tarjeta integrada que contiene los datos de consumo y transmisión

Figura 2

Evidencia en terreno



Nota: Elaboración propia (2025).

Imagen de un módulo de comunicación con daños evidentes en el área del conector SMA, generados por un ajuste incorrecto durante la instalación del adaptador de antena

Justificación

La presente justificación parte de la identificación de medidores que no presentan trasmisión, ni procesamiento de datos, dicha problemática compromete la confiabilidad del sistema de monitoreo. En congruencia con esta situación se plantea la revisión del proceso de ensamble del adaptador SMA (pigtail) al módulo de comunicación, puesto que se ha identificado que una de las causas recurrentes de falla está relacionada con un ajuste deficiente del conector. Realizar este proceso de manera inadecuada representa que el adaptador quede suelto, afectando la conexión entre la antena y la tarjeta electrónica, lo que deriva en perdida de comunicación. La revisión detallada del proceso evidencia fallas especialmente en el punto de ajuste, donde la utilización de herramientas inadecuadas como realizar el agarre interno con pinzas y el ajuste externo con rache limita una fijación correcta. Por tanto, este proyecto pretende optimizar el

proceso de ensamblaje con el fin de mitigar reprocesos, mejorar la estabilidad mecánica del sistema y garantizar la transmisión continua de datos desde los dispositivos.

Objetivos.

Objetivo general.

Plantear una propuesta de mejora en el proceso de ensamble del adaptador SMA en los medidores de telemetría de la empresa BTP Medidores y Accesorios S.A.S. empleando herramientas de Lean Six Sigma, con el fin de reducir fallas de transmisión en dispositivos instalados en campo.

Objetivos específicos.

- Identificar y delimitar el problema relacionado con las fallas de transmisión en los medidores de telemetría instalados en campo, enfocándose en el proceso de ensamble del adaptador SMA como posible causa raíz utilizando el SIPOC y el VOC como recurso de apoyo.
- Realizar una revisión de los medidores instalados en campo para identificar cuántos presentan problemas de transmisión y documentar los hallazgos con fotografías y registros básicos mediante la herramienta de Indicadores (KPI) y Paretto.
- Analizar los datos recopilados durante la revisión de campo aplicando herramientas estadísticas como análisis de frecuencia, medidas de tendencia central y dispersión, y diagramas de control, con el fin de identificar patrones, comportamientos anómalos y principales causas asociadas a las fallas de transmisión en los medidores.
- Proponer mejoras evolutivamente en las herramientas y técnica de ajuste del adaptador SMA para asegurar su fijación adecuada en la tapa del módulo de comunicación apoyándonos con las herramientas de PokaYoke y SOP.

- Documentar el nuevo procedimiento estandarizado de ensamble con mejoras incluidas, y capacitar al personal técnico en su correcta aplicación mediante evidencias de datos generadas a través de Dashboards y CTQ (Critical to Quality).

Capítulo 2

Marco teórico.

La eficiente transmisión de datos entre sistemas de telemetría no depende únicamente del software y las redes de comunicación, sino también de la calidad y el correcto ensamble de sus piezas. En especial los adaptadores tipo SMA utilizados en medidores inteligentes, ya que actúan como una pieza clave en la comunicación entre el dispositivo y los sistemas de comunicación inalámbrica. Por tal motivo se requiere una extremada precisión durante el proceso de ensamble para evitar pérdidas de señal, desconexiones de sus partes y fallas de transmisión. Teniendo en cuenta lo anterior se revisarán los antecedentes y fundamentos técnicos que sustentan esta propuesta.

Ensamble y calidad del conector SMA

Varios estudios resaltan que el mal ensamble del conector SMA puede afectar directamente en la calidad de la comunicación evitando la perdida de la señal o provocar que el dispositivo no se comunique de manera adecuada con el Gateway, como lo reportan Jacobsen y Popovski, quienes dedujeron que más del 15% de los paquetes de comunicación enviados por los medidores inalámbricos se pierden a fallas en el enlace en el proceso de fabricación, lo cual rescata que el proceso de ensamble de las piezas es fundamental para garantizar las condiciones adecuadas para la correcta comunicación de los sistemas. (Jacobsen y Popovski, 2013).

Antecedentes nacionales e internacionales

A nivel nacional, la Universidad de Nariño implemento un sistema AMI que integraba hardware, comunicación GPRS y una plataforma de monitoreo, demostrando que la calidad en el ensamble de los adaptadores y las pruebas de conectividad previas a las instalaciones son esenciales para el correcto funcionamiento de la telemetría (Revelo, et al., 2017).

A nivel internacional, (Nardelli, 2015), presentaron un modelo matemático para optimizar la comunicación entre medidores y monitores remotos, mostrando cómo errores mecánicos pueden limitar el rendimiento del enlace inalámbrico dentro del sistema de comunicación, por otro lado, proyectos en plataformas como ResearchGate han documentado sistemas de medición IoT con conectividad Wi-Fi, donde el control del ensamblaje fue clave para la estabilidad de la señal.

Ensamble de conectores eléctricos

Un estudio realizado en el departamento de tecnología de automatización industrial de la universidad técnica de Berlín indica que las tareas de ensamble de conectores electrónicos deben tener una alta presión, debido a que la tolerancia de ajuste entre la piezas debe hacerse con la fuerza necesaria teniendo en cuenta lo sensible de sus componentes, teniendo en cuentas todos estos parámetros proponen implementar dedos monolíticos (Hartisch y Haninger, 2023), estos permitirán tener el agarre adecuado de las piezas sin comprometer a las mismas, permitiendo al mismo tiempo realizar la fuerza necesaria para tener la tolerancia de ajuste ideal.

Importancia del torque en los procesos de ensamble

La organización Internacional de Normalización (ISO) establece que, en los procesos de manufactura y ensamble electrónico, el ajuste correcto de las uniones atornilladas es un factor clave para generar confiabilidad y garantizar la calidad del producto final para uso del cliente. El torque aplicado en las piezas influye directamente en la estabilidad de estas para no ocasionar desajuste por no apretar adecuadamente, ni daños por exceso de torque. En este sentido la estandarización del torque mediante herramientas de calibración asegura el ajuste adecuado de las piezas sin generar reprocesos o fallas del producto ya terminado.

La norma ISO 6789 establece los requisitos mínimos de conformidad y métodos adecuados para utilizar las herramientas manuales para el ajuste controlado de las piezas y

tuercas apoyándose de herramientas electrónicas que permitan detectar el torque necesario de las piezas emitiendo señales físicas o auditivas para poder saber que se llegó a ese ajuste adecuado de las piezas. (ISO, 2017).

Marco conceptual.

En este apartado se explican los conceptos más importantes que se utilizarán a lo largo del proyecto. Tener claras estas definiciones ayuda a comprender mejor el problema, el objetivo de la propuesta y los factores que influyen en el funcionamiento de los medidores de telemetría.

Telemetría

La telemetría es una tecnología que permite enviar datos desde un equipo que está en un lugar determinado hasta una central o sistema que los recoge y analiza, sin necesidad de estar presente físicamente. En los sistemas de acueducto, esta tecnología se usa para conocer el consumo de agua en tiempo real por medio de señales inalámbricas (Arniella, 2017).

Medidores inteligentes

Son dispositivos que no solo miden el consumo de agua, sino que también tienen la capacidad de enviar esos datos automáticamente a través de redes como LoRa, GPRS o NB-IoT. Estos equipos hacen parte de los sistemas AMI, que buscan facilitar el control y análisis del consumo de manera remota (Revelo, et al., 2017).

Conector SMA

El conector SMA es un dispositivo de dimensiones pequeñas diseñado para unir cables o antenas a dispositivos electrónicos que trabajan con señales de radio o comunicación inalámbrica. Su uso es ampliamente reconocido en aplicaciones que requieren un sistema de comunicaciones estable como en sistemas de telemetría, redes loT, comunicaciones móviles. Debido a su estructura es muy importante que esté bien instalado, ya que un mal ajuste puede causar que se pierda la señal o que no funcione correctamente la comunicación (Sensors, 2021).

Falla de transmisión

Se refiere a cuando el medidor no tiene la capacidad de enviar los datos recolectados hacia el sistema central o el Gateway, interrumpiendo el flujo de comunicaciones en tiempo real. Este tipo de problema puede deberse a varias causas, como una antena mal instalada, un conector flojo, fallas en la señal o problemas técnicos internos del dispositivo (Jacobsen y Popovski, 2013).

Ensamble de componentes

El ensamble es el proceso de armar o unir correctamente las partes de un dispositivo. En el caso de los medidores, esto incluye ajustar el conector SMA a la tapa del módulo de comunicación. Si no se hace de forma adecuada, pueden presentarse fallas al momento de instalar la antena o durante la operación en campo (Juran, 1999).

Calidad del proceso

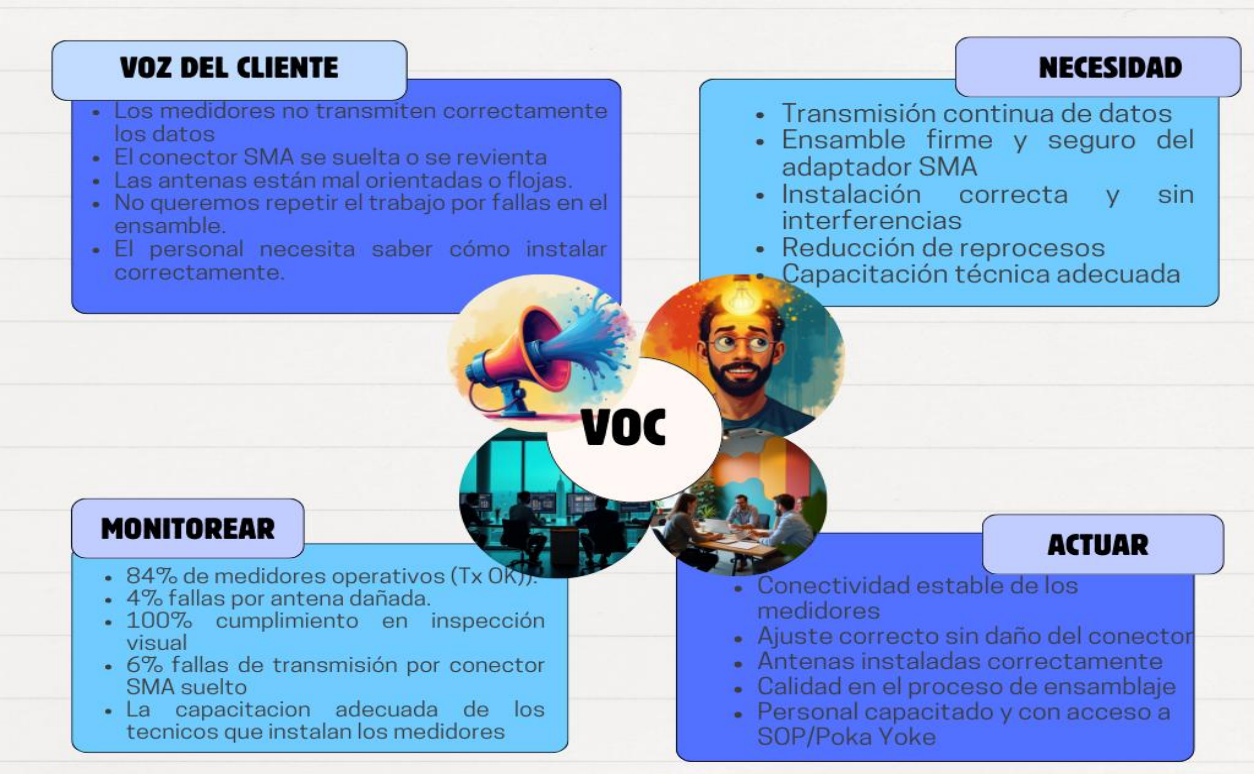
La calidad del proceso tiene que ver con hacer bien cada paso de la producción o ensamble, cumpliendo con estándares técnicos para evitar errores, reprocesos o fallas cuando el dispositivo ya está instalado. Una buena calidad asegura que el producto funcione de manera confiable (Juran, 1999).

Capítulo 3

A continuación, se presenta el desarrollo del primer objetivo planteado para el proyecto:

VOC (voz del cliente).

Figura 3
VOC (Voz del cliente)



Nota: Elaboración propia (2025).

La imagen muestra cómo la voz del cliente (VOC), expresa problemas que frecuentemente los medidores pueden tener, dentro de estos están que no transmiten datos, conectores SMA sueltos, antenas mal instaladas, retrasos en el flujo continuo del servicio, todos estos problemas generan necesidades que se deben cumplir para un correcto funcionamiento de los medidores y del conector para facilitar una buena transmisión de datos, dentro de estas necesidades podemos encontrar, un buen ensamble entre las piezas, una buena instalación para poder evitar reprocesos y brindar una buena capacitación de los instaladores, estas necesidades impulsan a actuar realizando acciones concretas para poder suplir todas las necesidades creadas y

finalmente, se desea monitorear el correcto funcionamiento de los transmisores ya que se inspeccionaron todos los medidores instalados y se encontró que el 84% de estos están transmitiendo adecuadamente, un 6% de los transmisores fallan en la transmisión por conector SMA suelto siendo parte del proceso de ensamble en el que nos vamos a enfocar y también se encontró que hay un 4% que falla por antena dañada, siendo estos los hallazgos encontrados en las inspecciones generan acciones a implementar en el proceso de ensamble del adaptador SMA con el fin de brindar una correcta transmisión enfocándose en el proceso de ensamble en el cual se desea implementar la mejora propuesta en los siguientes objetivos.

SIPOC

Figura 4
SIPOC



Nota: Elaboración propia (2025).

El diagrama SIPOC muestra el proceso de ensamblaje del adaptador SMA en medidores de telemetría, donde proveedores internos y externos suministran materiales, herramientas e instrucciones técnicas; el flujo inicia con la recolección de insumos y continúa con la instalación del adaptador, aplicación de traba rosca, colocación de arandelas y tuerca, ajuste y montaje de la antena, obteniendo como resultado un medidor funcional con conexión estable y trazabilidad documentada, asegurando calidad, cumplimiento de objetivos y satisfacción de clientes internos y externos.

Seguidamente se presenta el desarrollo del segundo objetivo:

KPI.

Figura 5

KPI (Indicador)

	INDICADOR	CÓDIGO:	FR-GC-002
		VERSIÓN:	003
		PÁGINA:	1 DE 1

Nombre del proceso:	Ejecución - Telemetría				
Nombre del indicador:	Transmisión medidores comunicados (MOSQUERA)				
Objetivo del indicador:	Medir el nivel de transmisión de los medidores comunicados				
Responsable del cálculo:	Diego Fernandez			**Meta:**	> 80%
Fórmula del indicador:	# MEDIDORES TRANSMITIENDO OK *100% TOTAL MEDIDORES INSTALADOS				
Frecuencia de cálculo:	Mensual	**Fuente de información:**	DIAGNOSTICO MEDIDORES, ARCHIVO EXCEL		
Presentación del indicador					
Periodo a calcular:					

TRANSMISION DE MEDIDORES COMUNICADOS

PRODUCTOS	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PORCENTAJE
MEDIDORES INSTALADOS	5333	5389	5450	5825	6198	6328	6753						
MEDIDORES COMUNICANDO	4380	4390	4645	5200	5200	5255	5694						84,2%
ANTENAS DAÑADAS	208	222	180	146	270	320	320						4,0%
CONECTOR SMA SUELTO	402	410	320	230	446	440	432						6,5%
FALLA EN MODULO POR	68	68	68	60	64	64	64						1,1%
DESGASTE DEL CABLE PIGTAIL	113	122	110	83	116	116	117						1,9%
MAL AJUSTE EN ENSAMBLE	145	160	110	89	89	120	113						2,0%
INTERFERENCIA EXTERNA	17	17	17	17	13	13	13						0,3%
META	65%	65%	70%	70%	75%	75%	75%	80%	80%	85%	90%	95%	
% Medidores transmitiendo	82%	81%	85%	89%	84%	83%	84%	0%	0%	0%	0%	0%	84%

Nota: Elaboración propia (2025).

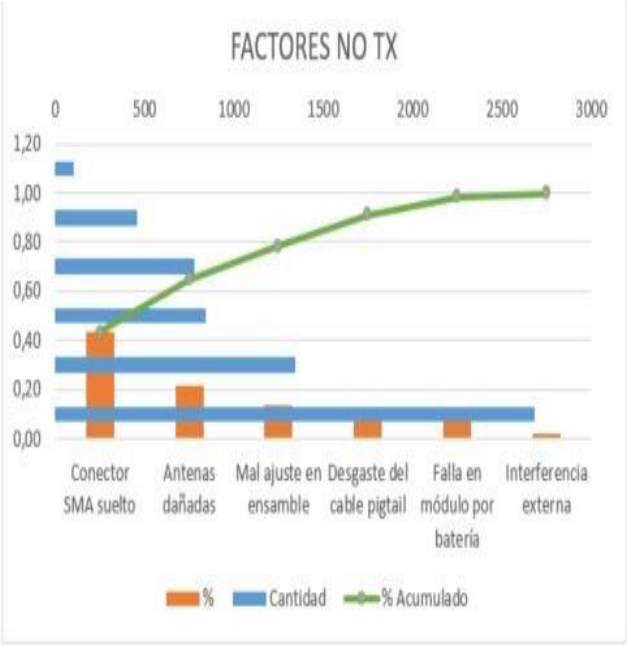
El reporte mensual es una herramienta fundamental dentro de la gestión de los sistemas de medición, ya que permite no solo identificar el desempeño de la transmisión de datos por parte de

los medidores, sino también analizar en detalle las posibles causas de la falta de comunicación con el centro de control o con los dispositivos receptores. Esta imagen evidencia un seguimiento del comportamiento de los equipos, dejando ver patrones de fallas, problemas de conexión asociados a los adaptadores o a la señal, así como incidencias derivadas del entorno de instalación. Donde mostro que el 84% de los medidores funcionan y transmiten los datos de manera adecuada, así mismo se observa que hay un 16% de los medidores que no transmiten adecuadamente dividiéndose entre un 4% por antenas dañadas, un 6,5% de conector SMA suelto, 1,1% por falla del módulo de la batería, 1,9% por desgaste del cable pigtail, un 2% por mal ajuste en ensamble de este y un 0,3% por interferencias externas que puedan alterar la transmisión. De esta manera, se facilita el monitoreo de los medidores con el objetivo de tomar decisiones correctivas oportunas.

Paretto.

Figura 6
Paretto

Causa	Cantidad	%	% Acumulado
Conector SMA suelto	2680	0,43	0,43
Antenas dañadas	1346	0,22	0,65
Mal ajuste en ensamble	843	0,14	0,78
Desgaste del cable pigtail	777	0,13	0,91
Falla en módulo por batería	456	0,07	0,98
Interferencia externa	103	0,02	1,00



Nota: Elaboración propia (2025).

El gráfico presentado corresponde a un diagrama de Pareto, cuyo propósito es identificar y priorizar las principales causas por las que ciertos medidores no están transmitiendo datos (“No TX”). En él, las barras representan la cantidad de casos asociados a cada factor, ordenados de mayor a menor incidencia, mientras que la línea acumulada indica el porcentaje que dichas causas representan sobre el total. Los resultados muestran que el “Conector SMA suelto” y las “Antenas dañadas” concentran más del 60 % de las fallas detectadas, y que al incluir “Mal ajuste en ensamble” y “Desgaste del cable pigtail” se supera el umbral del 80 %, confirmando el principio de Pareto. Este análisis sugiere que la atención prioritaria a estos cuatro factores permitiría reducir significativamente los problemas de transmisión, optimizando recursos y mejorando la eficiencia del sistema.

Acto continuo presentaremos los procesos estadísticos que demuestran un análisis de los datos recolectados mediante los indicadores anteriormente mostrados para ejecutar el tercer objetivo de nuestra investigación:

Análisis de frecuencia

Tabla 2

Análisis de frecuencia

CAUSA PRINCIPAL	FRECUENCIA TOTAL (ENE–JUL)	PORCENTAJE SOBRE TOTAL FALLAS
Antenas dañadas	2.013	~46 %
Conector SMA	3.046	~35 %
Falla en módulo	502	~6 %
Por batería	470	~5 %
Desgaste del cable	871	~10 %
Digital mal ajuste	858	~10 %
Ensamble interferencia externa	103	~1 %

Nota: Elaboración propia (2025).

"Antenas dañadas" y "Conector SMA" representan más del 80% de las causas de no transmisión. Lo que afecta directamente a la comunicación adecuada de los datos recolectados por el transmisor. Estos resultados fueron obtenidos a través de los datos que refleja el kpi señalado en el segundo objetivo

Medidas de tendencia central y dispersión.

Tabla 3

Medidas de tendencia central

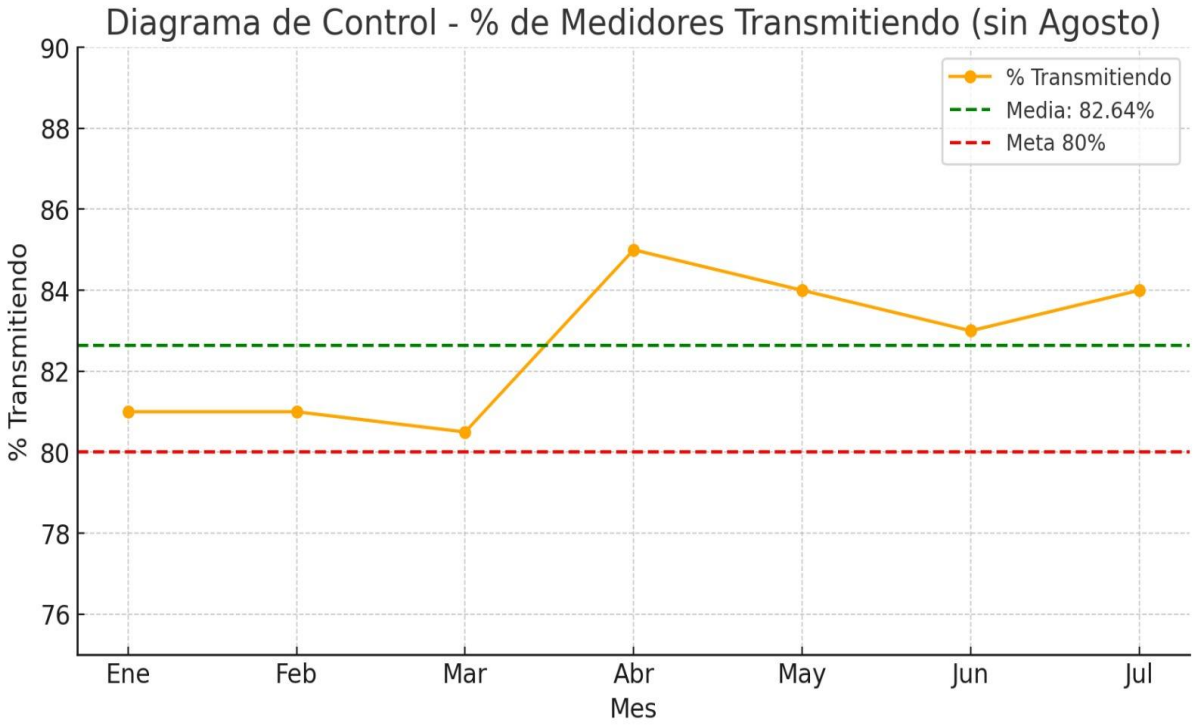
Tomando el porcentaje de medidores transmitiendo (Ene–Ago):	
Media:	82,25%
Mediana:	82,00%
Mínimo:	81 % (Feb, Mar)
Máximo:	84 % (Jun, Jul, Ago)
Rango:	3 puntos porcentuales
Desviación estándar:	1%

Nota: Elaboración propia (2025).

La variabilidad mensual es baja; el sistema mantiene un desempeño estable, pero no logra superar de forma constante el 85 %, que es una meta intermedia antes de llegar al 95 % planificado para diciembre.

Diagrama de control.

Figura 7
Diagrama de control



Nota: Elaboración propia (2025).

La línea verde punteada representa la media del periodo, mientras que la línea roja señala la meta del 80%; todos los puntos registrados se encuentran por encima de este objetivo, lo que evidencia control y cumplimiento.

Tabla 4
Medidas de dispersión

Medidas de tendencia central	Medidas de dispersión
Media: 83.43%	**Rango:** 4 (máx. 85% - mín. 81%)
Mediana: 83.50%	**Varianza:** 2.11
Moda: 81%	**Desviación estándar:** 1.45

Nota: Elaboración propia (2025).

El rendimiento promedio del 83,43% se encuentra por encima de la meta establecida del 80%, lo que refleja un desempeño positivo; además, la baja dispersión, evidenciada por una

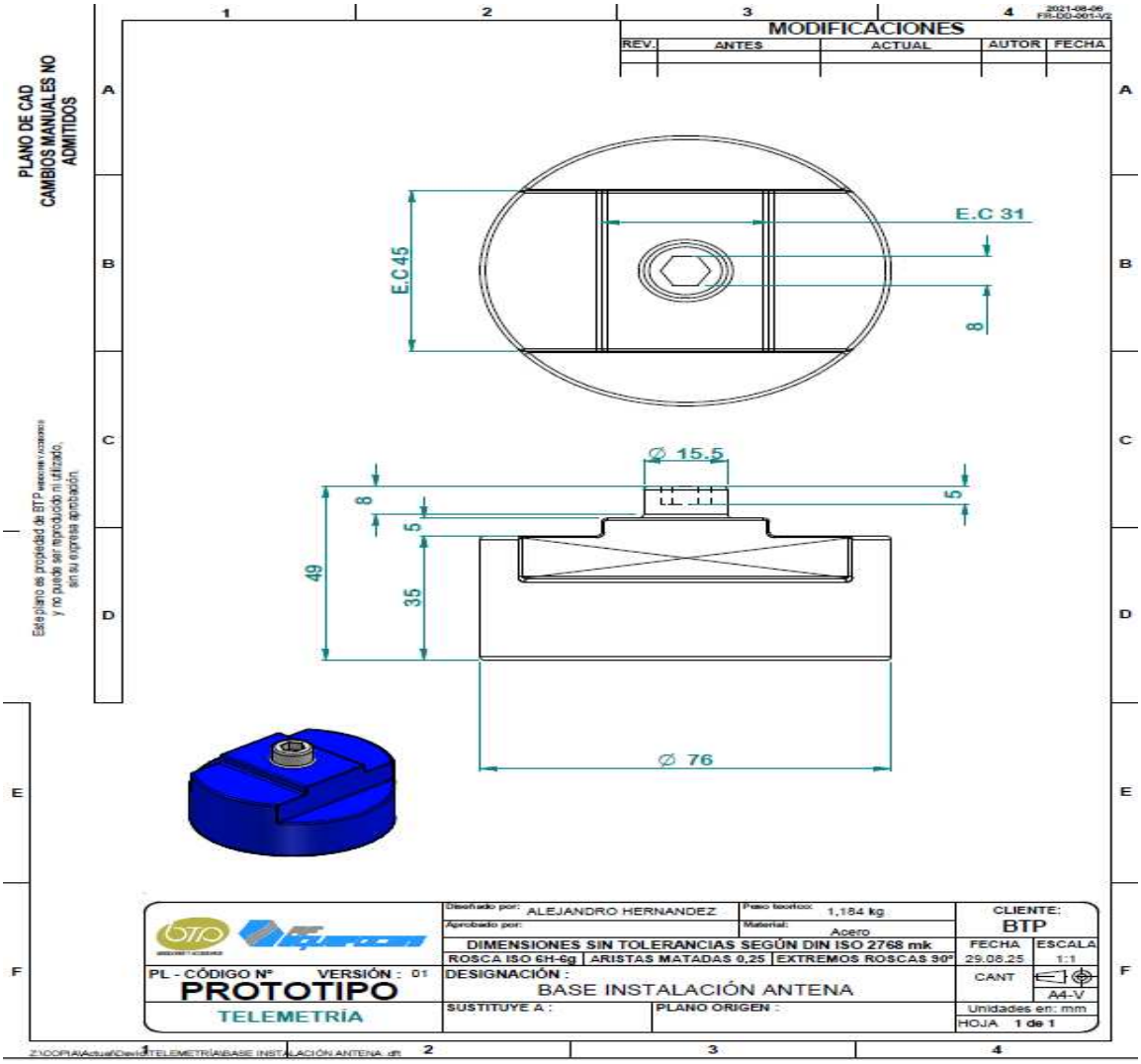
desviación estándar reducida, indica estabilidad en el indicador, mientras que los valores más bajos registrados en enero y febrero (81%) también cumplen con la meta.

Seguidamente de realzar todo el análisis estadístico que implican el hallazgo de las fallas de transmisión detectadas en los transmisores y de encontrar el punto crítico dentro del proceso de ensamble del pigtal vamos a implementar el cuarto objetivo de nuestra investigación:

Poka Yoke

Figura 8

Plano de base de instalación antena



Nota: Elaboración propia (2025).

Planos de la base a implementar en el ensamble del adaptador SMA

Figura 9

Poka-Yoke para la instalación del conector SMA



Nota: Elaboración propia (2025).

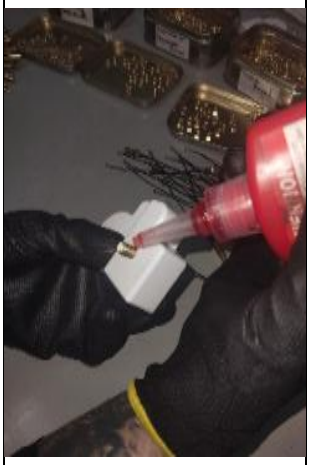
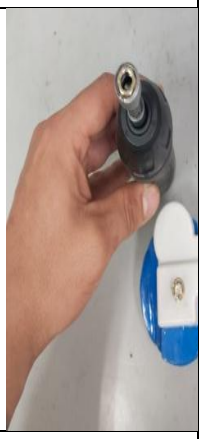
Dispositivo ejecutado en el área de mecanizado de acuerdo con el plano, utilizando el torno como herramienta principal de trabajo con el fin de brindar los acabados necesarios y proporcionarle correcta funcionalidad al POKA-YOKE para realizar de manera correcta el ensamble del conector SMA y reducir tiempos en el proceso.

SOP (Procedimiento Operativo Estándar)

Tabla 5

SOP (Procedimiento Operativo Estándar)

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE	IMAGEN
Alistamiento de materiales.	Recolectar todas las piezas que se requieren para realizar el ensamble del adaptador SMA a la tapa contenedor del módulo de comunicación, los cuales se componen de: Arandela lisa, arandela de seguridad, conector SMA, tuerca de seguridad, pegante traba rosca y tapa contenedor.	Telemetría.	 
Insertar adaptador SMA (pigtail).	Se inserta el adaptador SMA a el dispositivo Poka-Yoke y seguido de este se ubica la tapa contenedor sobre el pigtail		 

Aplicación pegante.	Se agrega una cantidad considerable de pegante traba rosca en los hilos de la pieza (adaptador SMA) con el fin de sellar bien las arandelas y tuercas.		
Ensamble de piezas.	Se inserta sobre la rosca del adaptador SMA todas las arandelas y la tuerca en la siguiente posición: 1. Arandela lisa. 2. Arandela de seguridad. 3. Tuerca de seguridad.		
Ajuste de la pieza.	Se colocará la tapa del contenedor sobre la base de instalación asegurándose de que encaje justamente insertando la tuerca de seguridad por el agujero de la base, seguidamente se utilizará un destornillador eléctrico para ajustar la tuerca de la tapa hasta que quede justo.		

Instalación paleta rubber.	Se instala la antena rubber en la rosca del adaptador SMA ajustándola hasta su tope.		

Nota: Elaboración propia (2025).

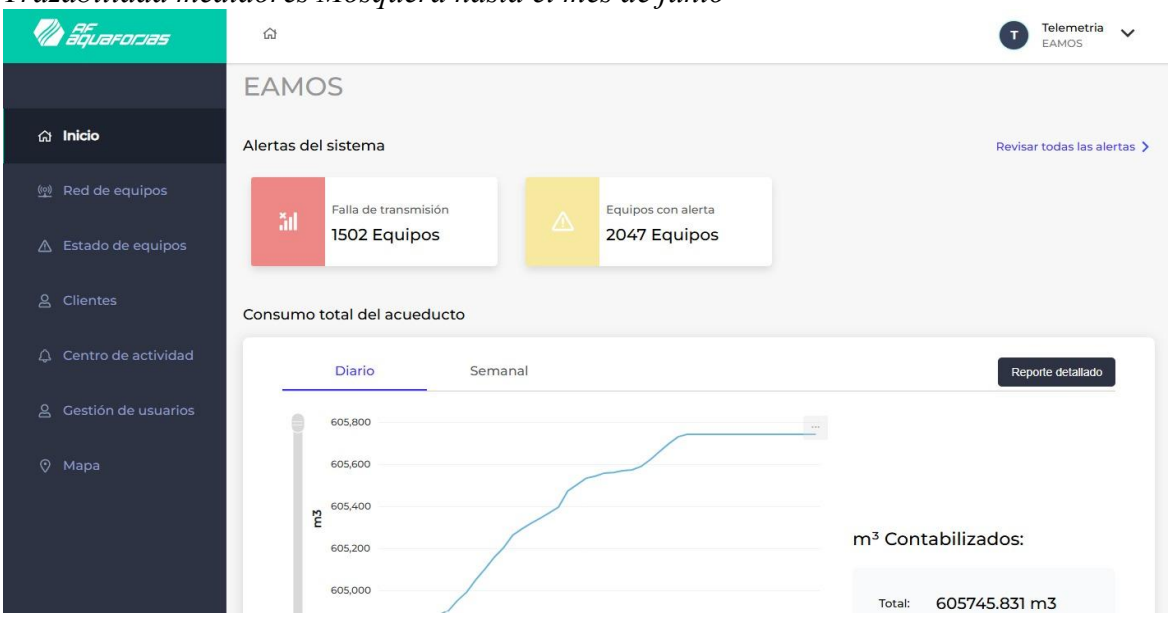
Por medio del SOP se llevó a cabo la estandarización del documento, en el cual se incluyen instrucciones precisas y detalladas sobre el procedimiento a seguir para realizar de manera adecuada el ensamble del conector SMA en la tapa contenedor. Dicho procedimiento no solo establece los pasos secuenciales que deben cumplirse, sino que también incorpora herramientas de apoyo orientadas a la reducción de errores y a la mejora de la calidad del proceso. Se emplea la mejora del Poka-Yoke para tener certeza de la Calidad de ensamble del transmisor, cuyo objetivo es brindar un apoyo visual para poder realizar la actividad de una mejor manera.

Para poder tener un control de las mejores implementadas con la metodología Lean Six Sigman vamos a apoyarnos en las herramientas Dashboard y CTQ para poder monitorearlas y tener la descripción clara del proceso de ensamble:

Dashboard

Figura 10

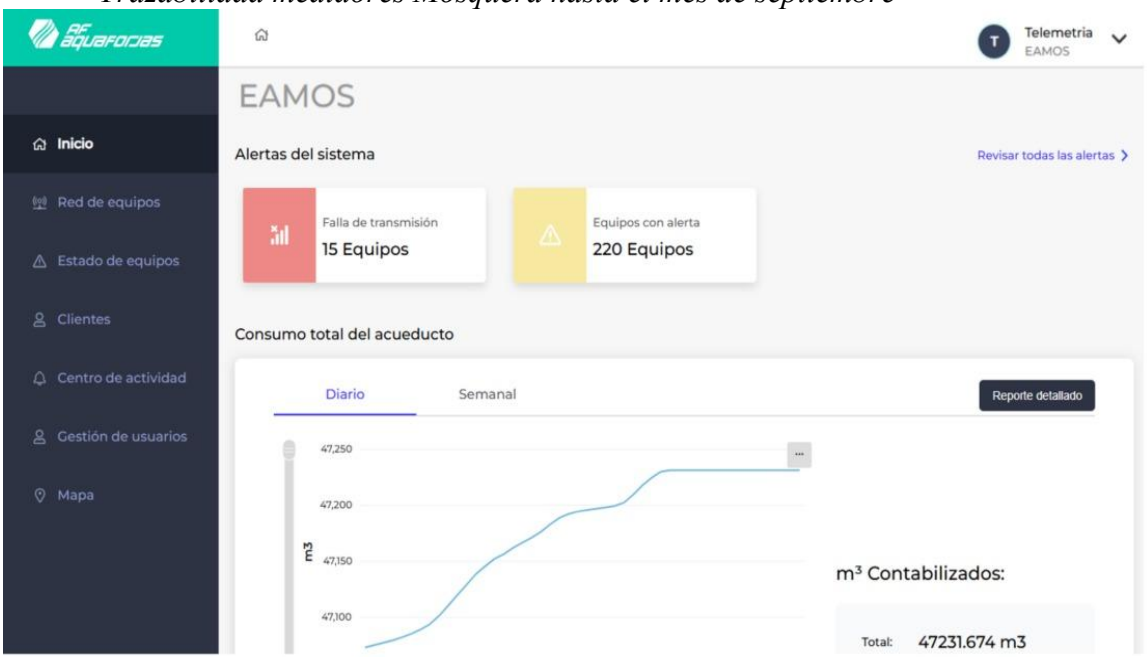
Trazabilidad medidores Mosquera hasta el mes de junio



Nota: Elaboración propia (2025).

Figura 11

Trazabilidad medidores Mosquera hasta el mes de septiembre



Nota: Elaboración propia (2025).

Mediante la implementación del dispositivo POKA-YOKE en el proceso de ensamble del conector SMA en referencia a el área de telemetría, se ha evidenciado a través de la trazabilidad de los datos el impacto positivo que ha generado el instrumento operativo en la trasmisión de medidores comunicados atacando directamente fallas como lo son: antenas dañadas, conector SMA suelto, desgaste del cable pigtail y mal ajuste en ensamble del conector SMA, reduciendo los medidores con fallas de transmisión aproximadamente en un 80% dentro de un periodo de dos meses.

CTQ (Critical to Quality).

Tabla 6

Procesos críticos.

Elemento crítico (CTQ)	Qué controlar	Cómo medir / verificar	Frecuencia	Responsable	Acción correctiva si falla
Torque de apriete del conector SMA	Ajuste correcto (ni flojo ni excesivo)	Llave dinamométrica calibrada	Cada ensamble	Operario de ensamble	Detener proceso, reajustar con torque correcto
Aplicación de traba rosca	Presencia y cantidad adecuada	Inspección visual	Cada ensamble	Operario / Supervisor	Retirar pieza y repetir proceso
Secuencia de arandelas y tuerca	Orden correcto (arandela lisa → arandela de seguridad → tuerca)	Checklist de ensamble	Cada ensamble	Operario de ensamble	Rehacer ensamble desde el inicio
Integridad del adaptador SMA	Que no presente daños en rosca ni fisuras	Inspección visual + lupa	Al inicio de cada lote	Supervisor de calidad	Cambiar adaptador defectuoso
Prueba de comunicación del medidor	Señal TX correcta en gateway	Dashboard / Software monitoreo	100% de unidades antes de despacho	Área de Telemetría	Retener lote, reensamblar conectores defectuosos
Capacitación de operarios	Conocimiento del procedimiento estándar	Lista de asistencia + mini test	Trimestral	Jefe de producción	Reentrenar inmediatamente al personal no competente

Nota: Elaboración propia (2025).

Dentro de lo que se contempla en relación con las necesidades del cliente se pretende contar con medidores que trasmitan datos en tiempo real, con una baja tasa de fallas y reprocesos, de esta manera brindar una instalación confiable que permita aportar a la reducción de costos y evitar mantenimientos en terreno. Teniendo en cuenta lo anterior es necesario establecer los requerimientos críticos fundamentales que se derivan en una conexión estable del conector SMA, procesos estandarizados de este mismo ensamble para lograr un alto nivel de comunicación y brindar fiabilidad al cliente. Para garantizar que esto se cumpla se realizó una serie de especificaciones de los procesos divididos en el correcto aplique de la pegante traba rosca, ensamble de las arandelas en la secuencia correspondiente, precisión y aseguramiento del torque en el rango establecido, entre otros procesos, sin embargo, priorizando siempre la debida y correcta capacitación de los operarios para realizar el procedimiento. Una vez controlado esta serie de procesos se prevé cuantificar a través de métricas definidas que se centran en obtener en un periodo corto un porcentaje de comunicación de medidores del 95%, realizar seguimiento continuo al proceso para sostener un 98% de efectividad en el ensamble y a su vez la eficacia y tiempos de proceso no superen un máximo de dos minutos por elemento manteniendo los reprocesos en campo controlados y en un porcentaje menor al 5%.

Para poder evaluar la mejora implementada dentro de los objetivos planteados en nuestro proyecto de investigación presentamos:

Costo Beneficio.

Figura 12

Costo beneficio.

Inversion Inicial	$ 500.000,00
Tasa de descuento	8%

Estado Actual

	0	1	2	3	Val. Presente
Beneficio	$ -	$ 12.000.000,00	$ 12.000.000,00	$ 12.000.000,00	$ 30.925.163,85
Costo	$ 500.000,00	$ 100.000,00	$ 100.000,00	$ 100.000,00	$ 757.709,70

Relacion Costo beneficio estado actual	40,81400027

Poka Yoke

	0	1	2	3	Val. Presente
Beneficio	$ -	$ 17.500.000,00	$ 17.500.000,00	$ 17.500.000,00	$ 45.099.197,28
Costo	$ 500.000,00	$ 166.666,67	$ 166.666,67	$ 166.666,67	$ 929.516,16

Relacion Costo beneficio con Poka Yoke Implentado	48,51900268

Nota: Elaboración propia (2025).

La imagen presenta un análisis comparativo entre el estado actual del proceso de ensamble del adaptador y la implementación de la herramienta Poka-Yoke, considerando una inversión inicial de $500.000 y una tasa de descuento del 8%. En el escenario actual, los beneficios mensuales alcanzan $12.000.000 con costos de $100.000 por mes, obteniendo un valor presente de beneficios de $30.925.164 frente a costos de $757.710, lo que da una relación costo-beneficio de 40,81. En contraste, con la implementación del Poka-Yoke los beneficios aumentan a $17.500.000 anuales y los costos a $166.666,67 por año, generando un valor presente de beneficios de $45.099.197 frente a costos de $929.516, con una relación costo-beneficio superior de 48,51. Esto evidencia que la aplicación del Poka-Yoke mejora la rentabilidad del proceso, incrementando los beneficios frente a los costos y demostrando mayor eficiencia económica.

Recomendaciones

Se recomienda mantener actualizado y debidamente documentado el Procedimiento Operativo Estándar (SOP) del proceso de ensamble del adaptador SMA, garantizando que cada paso esté claramente definido y acompañado de los parámetros técnicos necesarios, como el torque y la secuencia correcta de piezas. Esta estandarización permitirá disminuir la variabilidad en la operación y asegurar que los resultados obtenidos sean consistentes en todos los lotes de producción.

Asimismo, es fundamental implementar un programa de capacitación continua para los operarios involucrados en el ensamble. Estos entrenamientos deben realizarse de manera periódica, reforzando el uso adecuado de herramientas, la aplicación correcta de los controles de calidad y la comprensión del Poka-Yoke. El refuerzo constante de competencias reducirá la probabilidad de errores humanos y asegurará la sostenibilidad del proceso en el tiempo.

En cuanto al aseguramiento de la calidad, resulta conveniente establecer controles preventivos que incluyan inspecciones visuales, pruebas rápidas de comunicación y verificaciones aleatorias antes de liberar los lotes de medidores al cliente. El uso de dashboards en tiempo real se convierte en una herramienta importante para monitorear el desempeño del proceso y detectar de manera temprana cualquier hallazgo que pueda comprometer la adecuada comunicación del sistema.

Por otra parte, es importante fortalecer la gestión de indicadores de desempeño (KPI), realizando un seguimiento mensual del porcentaje de medidores en correcto funcionamiento y estableciendo alertas cuando este descienda del nivel esperado. Este control facilitará la implementación de acciones correctivas inmediatas, evitando reprocesos y reduciendo costos derivados de mantenimientos en campo.

Finalmente, se sugiere mantener la filosofía de mejora continua mediante la aplicación recurrente del ciclo DMAIC, no solo en el ensamble del conector SMA, sino también en otros componentes críticos como antenas, cables pigtail y módulos de comunicación. De esta manera, la empresa podrá ampliar el alcance de los resultados positivos obtenidos, consolidando un sistema de producción más robusto, eficiente y confiable.

Conclusiones

1. La propuesta de mejora del ensamble del adaptador SMA, apoyada en herramientas Lean Six Sigma, permitió evidenciar que un proceso estandarizado, con dispositivos de control como el Poka-Yoke y el SOP, incrementa la estabilidad de la conexión y reduce de manera significativa las fallas de transmisión en campo. Esto garantiza no solo mayor confiabilidad de los medidores de telemetría, sino también un impacto positivo en la eficiencia operativa y en la satisfacción del cliente.

2. La identificación y delimitación del problema a través del análisis VOC y SIPOC permitió reconocer que las fallas en la transmisión estaban directamente relacionadas con deficiencias en el ensamble del conector SMA. Este diagnóstico inicial fue clave para comprender la magnitud del problema y direccionar adecuadamente las acciones de mejora.

3. La revisión de los medidores en campo, junto con la aplicación de KPI y Pareto, permitió establecer que más del 60 % de las fallas de transmisión se debían a conectores sueltos o mal ensamble y antenas dañadas. Con este análisis se logró priorizar los factores críticos a intervenir, facilitando la toma de decisiones y el enfoque de los recursos en las causas de mayor impacto.

4. El análisis estadístico de frecuencia, medidas de tendencia central y diagramas de control mostró un desempeño estable, con un promedio superior al 80 %, pero evidenció que la meta de confiabilidad aún no se alcanzaba de manera sostenida. Estos resultados confirmaron la necesidad de implementar mejoras técnicas en el proceso de ensamble para reducir la variabilidad y aumentar la confiabilidad de los dispositivos.

5. La implementación del Poka-Yoke y la estandarización mediante SOP demostraron ser soluciones efectivas para asegurar un ensamble correcto del adaptador SMA. Estas herramientas no solo redujeron los tiempos de operación y la probabilidad de error humano,

sino que también mejoraron la calidad del producto final, disminuyendo reprocesos y costos asociados a mantenimientos correctivos.

6. La documentación del nuevo procedimiento y la capacitación del personal, apoyadas en herramientas de control como Dashboard y CTQ, permitieron consolidar un proceso más robusto y sostenible en el tiempo. Los resultados reflejaron una reducción cercana al 80 % en las fallas de transmisión y un incremento en la rentabilidad, validando la efectividad de la mejora implementada.

7. El análisis comparativo entre el proceso de ensamble actual y la implementación del dispositivo Poka-Yoke evidenció que la propuesta de mejora no solo optimiza la calidad del ensamble y reduce las fallas de transmisión, sino que también incrementa la rentabilidad del proceso. La relación costo-beneficio pasó de 40,81 a 48,51, lo que refleja un uso más eficiente de los recursos y una mayor generación de valor para la empresa. En consecuencia, la inversión inicial resulta altamente justificable al traducirse en beneficios económicos sostenibles y en un sistema de telemetría más confiable para los clientes.

Referencia

Arniella. (2017). *Arniella, E. F. (2017). Evaluación de Tecnologías Inteligentes para Infraestructura Hídrica (SWIT).* Obtenido de https://doi.org/10.18235/0006353

ISO, 6.-1. (2017). *Requirements and methods for design conformance testing and quality conformance testing: minimum requirements for declaration of conformance.* [Requisitos y métodos para el diseño de ensayos de conformidad y calidad: Requisitos minimos para la declaración de conformidad] Obtenido de: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62549/da74a76f1bef49c5a46f86d1f25ee79f/ISO-6789-1-2017.pdf

Jacobsen y Popovski, R. (21 de Mayo de 2013). *Reliable Reception of Wireless Metering Data with Protocol Coding [Recepción confiable de datos de medición inalámbrica con codificación de protocolo]*. Obtenido de arXiv: https://arxiv.org/abs/1305.4786

Revelo, J. Imbajoa, D. Arciniegas, A. (24 de Febrero de 2017). *Diseño e implementación de un Sistema de Medición Inteligente para AMI de la microrred de la Universidad de Nariño.* Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/5722/572262176022/html/

Juran, G. (1999). Juran's Quality Handbook[Manual de calidad de Juran]. McGraw-Hill Professional 5.ª ed.Obtenido de: https://staff.universitaspahlawan.ac.id/web/upload/materials/6257-materials.pdf

Nardelli, P. H. (2015). *Maximizing the link throughput between smart-meters and aggregators. .* Obtenido de IEEE Transactions on Smart Grid, 6(1), 271–278.: https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2349356

ONAC. (23 de Enero de 2014). *Directorio ONAC*. Obtenido de ONAC: https://onac.org.co/directorio3/index.php/acreditaciones/13-LAC-036?utm_source=chatgpt.com

Hartisch, R.M. y Haninger, K. (28 de Julio de 2023). *Cornell University.* Obtenido de Cornell University: https://arxiv.org/pdf/2307.15589

Sensors. (2021). *Investigation on wireless link performance with improper SMA connector mounting*. Obtenido de Investigation on wireless link performance with improper SMA connector mounting: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1431