

**Eliminación de defectos por goteo en el ensamble válvula-tanque mediante rediseño del espigo y validación de acople geométrico**

Angie Camila Grisales Miranda

Asesor

Edwin Eliecer Casanova

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Industrial

2025

## Resumen

La creciente necesidad de optimizar procesos industriales mediante soluciones de ingeniería aplicada ha revelado una brecha crítica entre los rediseños teóricos y su implementación efectiva en condiciones reales de manufactura. Esta investigación aborda dicha brecha mediante un enfoque integral que combina rediseño geométrico, validación funcional y control operativo cruzado para resolver fallas recurrentes de goteo en dispensadores domésticos de agua refrigerada. El objetivo principal fue eliminar el defecto funcional de goteo en el ensamble entre la válvula dispensadora y el espigo del tanque de agua, mediante un rediseño geométrico que corrigiera la interferencia dimensional existente y cuya efectividad fuera validada bajo condiciones funcionales reales. Se implementó un estudio de caso experimental aplicado a una línea industrial en Colombia. La metodología incluyó modelado 3D y ajuste dimensional del componente, validación funcional por más de 5.280 ciclos de dispensado con agua coloreada, inspecciones técnicas de rebabas internas y filos cortantes, y análisis cruzado del protocolo de ensamblaje mediante registros visuales, tabulación horaria y observación directa. Los resultados demostraron la eliminación total de goteo (0 incidencias) en las pruebas funcionales, validando la eficacia del rediseño. Se confirmaron las causas previas del fallo, que fueron descartadas sistemáticamente mediante control operativo. El nuevo diseño fue instalado directamente en línea sin alterar el ritmo productivo, confirmando su viabilidad industrial inmediata. Este estudio aporta evidencia empírica sobre la viabilidad de rediseños aplicados desde la ingeniería operativa, con alto potencial de estandarización en manufactura. Se recomienda formalizar la integración de auditoría dimensional y validación funcional dentro del sistema de aseguramiento de calidad, articulándolas desde etapas tempranas de diseño hasta la verificación postensamblaje. Este estudio ya incorporó dichas prácticas de manera piloto, especialmente en los análisis

cruzados de rebabas, contacto con superficies blandas, seguimiento horario y pruebas funcionales prolongadas, lo que permitió anticipar fallos y confirmar la eficacia del rediseño antes de su implementación industrial.

***Palabras clave:*** Acople geométrico; rediseño dimensional; validación funcional; manufactura industrial; control de calidad.

## Abstract

The growing need to optimize industrial processes through applied engineering solutions has revealed a critical gap between theoretical redesigns and their effective implementation under real manufacturing conditions. This research addresses this gap through an integrated approach that combines geometric redesign, functional validation, and cross-operational control to solve recurring leakage failures in household refrigerated water dispensers. The main objective was to eliminate the functional leakage defect in the assembly between the dispensing valve and the tank spigot through a geometric redesign that corrected the existing dimensional interference, with its effectiveness validated under real operational conditions. An experimental case study was implemented in an industrial production line in Colombia. The methodology included 3D modeling and dimensional adjustment of the component, functional validation over more than 5,280 dispensing cycles with colored water, technical inspections of internal burrs and sharp edges, and cross-analysis of the assembly protocol through visual records, hourly tabulation, and direct observation. The results demonstrated complete elimination of leakage (0 incidents) during functional testing, validating the redesign's effectiveness. The previously assumed failure causes were systematically ruled out through operational control. The new design was implemented directly on the production line without disrupting workflow, confirming its immediate industrial viability. This study provides empirical evidence on the feasibility of applied redesigns from the perspective of operational engineering, with high potential for standardization in manufacturing. It recommends formalizing the integration of dimensional auditing and functional validation within the quality assurance system, linking them from early design stages to post-assembly verification. These practices were piloted in this study, particularly through cross-analysis of

burrs, contact with soft surfaces, hourly tracking, and prolonged functional testing, enabling early failure detection and confirmation of redesign effectiveness prior to industrial deployment.

***Key words:*** Geometric coupling; dimensional redesign; functional validation; industrial manufacturing; quality control.

## Tabla de contenido

<u>Introducción .....</u>	<u>10</u>
<u>Justificación .....</u>	<u>13</u>
<u>Objetivos .....</u>	<u>15</u>
<u>Marco Teórico y Referencial .....</u>	<u>16</u>
<u>Diseño Metodológico.....</u>	<u>28</u>
<u>Marco de Intervención Técnica .....</u>	<u>33</u>
<u>Arquitectura Metodológica por Fases .....</u>	<u>36</u>
<u>Consolidación Técnica del Rediseño e Implementación .....</u>	<u>50</u>
<u>Resultados y Validación Técnica .....</u>	<u>67</u>
<u>Discusión Técnica y Proyección del Modelo .....</u>	<u>85</u>
<u>Conclusiones y Recomendaciones .....</u>	<u>106</u>
<u>Referencias .....</u>	<u>110</u>

## Lista de Tablas

<b><u>Tabla 1</u></b> <i>Comparativo dimensional del espigo Andrómeda antes y después del rediseño .....</i>	<b><u>59</u></b>
<b><u>Tabla 2</u></b> <i>Registro de incidencias por franja horaria y día de control .....</i>	<b><u>65</u></b>
<b><u>Tabla 3</u></b> <i>Correspondencia entre los objetivos específicos y los resultados esperados .....</i>	<b><u>115</u></b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Diagrama de Ishikawa del sistema válvula-espigo</i> .....	53
<b>Figura 2</b> <i>Esquema seccionado del sistema válvula-espigo</i> .....	55
<b>Figura 3</b> <i>Árbol de fallas del sistema válvula-espigo</i> .....	56
<b>Figura 4</b> <i>Análisis comparativo de SCR y costos de servicio técnico por país</i> .....	58
<b>Figura 5</b> <i>Comparativo técnico y visual del espigo antes y después del rediseño geométrico</i> .....	60
<b>Figura 6</b> <i>Pruebas funcionales de validación de goteo con trampa de papel craft</i> .....	62
<b>Figura 7</b> <i>Evaluación de rebabas y filos cortantes</i> .....	63
<b>Figura 8</b> <i>Secuencia operativa de ensamblaje</i> .....	64
<b>Figura 9</b> <i>Distribución estadística de dureza del o-ring de nitrilo autolubricado</i> .....	70
<b>Figura 10</b> <i>Validación dimensional de asientos de o-ring mediante escaneo 3D</i> .....	72
<b>Figura 11</b> <i>Mapa de desviación superficial del cuerpo técnico</i> .....	74
<b>Figura 12</b> <i>Análisis de capacidad del proceso para diámetro de o-ring</i> .....	76
<b>Figura 13</b> <i>Distribución estadística del diámetro del o-ring pequeño</i> .....	78
<b>Figura 14</b> <i>Distribución del diámetro funcional en tanques de agua Polar</i> .....	79
<b>Figura 15</b> <i>Evaluación estadística del diámetro funcional en tanques de agua AND</i> .....	81
<b>Figura 16</b> <i>Verificación dimensional por escaneo 3D del tanque vs TDD</i> .....	83
<b>Figura 17</b> <i>Comparación de dispersión para los diámetros</i> .....	85
<b>Figura 18</b> <i>Comparación dimensional entre los espigos Andrómeda y Polar</i> .....	87
<b>Figura 19</b> <i>Estudio de capacidad para el diámetro interior</i> .....	89
<b>Figura 20</b> <i>Boxplot de distribución para diámetro interior</i> .....	90
<b>Figura 21</b> <i>Estudio de capacidad para el diámetro exterior</i> .....	92
<b>Figura 22</b> <i>Gráfica de caja para el diámetro exterior</i> .....	94

## Lista de Apéndices

<u><a href="#">Apéndice A</a></u> <i>Tabla de trazabilidad entre objetivos y resultados esperados</i> .....	115
<u><a href="#">Apéndice B</a></u> <i>Laboratorio de metrología dimensional reporte de resultados</i> .....	117
<u><a href="#">Apéndice C</a></u> <i>Cotización técnica N.º 4182</i> .....	118
<u><a href="#">Apéndice D</a></u> <i>Planos ensamble válvula de agua</i> .....	119
<u><a href="#">Apéndice E</a></u> <i>Resultados SCR tendencias</i> .....	121
<u><a href="#">Apéndice F</a></u> <i>Impacto ambiental</i> .....	122

## Introducción

### Contextualización del Sistema Técnico

Los sistemas de dispensado en productos de consumo, como los tanques de agua, requieren que sus interfaces mecánicas cumplan con exigencias de precisión y confiabilidad para sostener la funcionalidad del conjunto durante su vida útil. Una de las uniones más sensibles en estos sistemas es la conexión entre el espigo del tanque y la válvula dispensadora, donde confluyen múltiples factores de diseño y fabricación que determinan la capacidad de sellado, la facilidad de ensamblaje y la resistencia a fallos en operación (Parker O-Ring Handbook, 2007).

El espigo actúa como el componente de interfaz directa con la válvula, y su configuración geométrica —incluyendo dimensiones, tolerancias y acabado superficial— condiciona el comportamiento del o-ring, cuya función es generar un sellado hidráulico bajo compresión. Cuando el diseño o la manufactura del espigo no consideran con precisión las necesidades de deformación controlada del o-ring, el sistema se vuelve susceptible a filtraciones o desplazamientos no deseados (Global O-Ring and Seal, s. f.; ISO 3601-1:2012). La relación entre el acople mecánico y el comportamiento del sello ha sido ampliamente estudiada en literatura técnica, destacando la necesidad de validar experimentalmente las configuraciones geométricas mediante ensayos de interferencia y pruebas funcionales (Parker Hannifin Corporation, 2007).

A partir de un contraste funcional entre dos versiones del mismo sistema, el análisis técnico se centra en el sistema de ensamblaje espigo-válvula de dos modelos de tanque, que presentan diferencias mínimas en sus configuraciones, pero con resultados de desempeño marcadamente distintos. Este contraste permite construir un marco comparativo útil para comprender cómo decisiones de diseño que parecen marginales pueden derivar en variaciones significativas en la respuesta funcional del sistema.

La lógica técnica del proyecto sigue el enfoque DMAIC, aplicado como base metodológica para delimitar el problema, validar el rediseño y garantizar su sostenibilidad. Su desarrollo completo se aborda en el capítulo metodológico.

### **Planteamiento del Problema**

En el proceso de fabricación de dispensadores de agua, la unión entre el espigo del tanque y la válvula dispensadora constituye una interfaz crítica para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Esta unión debe proporcionar un sellado hermético, permitir un ensamblaje sin interferencias excesivas y conservar su integridad bajo ciclos repetidos de uso. Cualquier desviación en estas condiciones puede generar defectos funcionales como el goteo, lo cual compromete la calidad del producto, incrementa los costos de garantía y afecta la percepción del cliente final.

Durante el análisis comparativo de dos referencias técnicas de tanque producidas por la misma empresa —Polar y Andrómeda— se evidenció que el modelo Andrómeda presentaba un índice significativamente mayor de reclamos por filtración en la unión espigo-válvula. Aunque ambos modelos compartían características geométricas generales, las diferencias sutiles en el diseño del espigo y su acople con la válvula inducían desplazamientos no controlados del o-ring durante el montaje, generando pérdida de estanqueidad.

Este defecto se tradujo en un aumento medible del Service Call Rate (SCR) para la referencia Andrómeda, así como en la necesidad de intervención correctiva por parte de personal técnico, afectando directamente los costos de no calidad y la eficiencia postventa. Al revisar los reportes de campo, se encontró que la mayoría de los casos involucraron fallos localizados en la zona de interfase entre el espigo del tanque y el alojamiento del o-ring en la válvula, lo que indica una incompatibilidad dimensional funcional entre los componentes.

Adicionalmente, se identificaron limitaciones en el proceso de control dimensional de los moldes utilizados para fabricar el espigo, así como ausencia de criterios geométricos de diseño validados para asegurar la alineación precisa y la compresión adecuada del elemento de sellado. En consecuencia, el problema no puede atribuirse únicamente a defectos de fabricación o de materiales, sino a un desajuste en el diseño funcional de la interfaz.

A partir de los hallazgos técnicos obtenidos, se delimita un problema puntual de ingeniería en el modelo Andrómeda: la persistencia de defectos por goteo en la zona de unión espigo-válvula, atribuibles a interferencias geométricas específicas y a la inexistencia de mecanismos de validación dimensional del diseño original. Resolver este problema requiere una intervención de rediseño funcional, sustentada en criterios precisos de acople, sellado y robustez de manufactura, con el fin de restaurar la funcionalidad operativa del sistema y reducir el impacto negativo sobre el rendimiento postventa.

El abordaje del problema se articula con la fase Definir del ciclo DMAIC, delimitando el sistema afectado, cuantificando el impacto operativo del defecto, y estableciendo una hipótesis técnica de causalidad basada en la interferencia dimensional no controlada. Esta hipótesis será evaluada mediante análisis geométrico comparativo, rediseño funcional del espigo, y validación del desempeño bajo condiciones reales de uso.

## Justificación

El defecto por goteo en el sistema de ensamblaje espigo-válvula representa una falla funcional que compromete directamente la confiabilidad del producto final y genera costos operativos innecesarios. Este tipo de defecto afecta tanto la experiencia del usuario como los procesos internos de garantía, y se refleja en indicadores como el Service Call Rate (SCR), entendido como la proporción de productos que requieren servicio postventa sobre el total de unidades expuestas en el mercado. Desde la perspectiva de la ingeniería de manufactura, abordar este problema requiere un enfoque riguroso que integre rediseño geométrico, validación funcional y análisis de viabilidad económica. En este marco, se plantea una alternativa de rediseño cuya efectividad será evaluada a partir de criterios técnicos y operativos, desarrollados en los capítulos siguientes.

Desde el punto de vista técnico, el rediseño del espigo debe considerar las condiciones de interferencia y deformación del o-ring, cuyas propiedades elásticas deben mantenerse dentro de rangos admisibles para asegurar la estanqueidad. La solución exige un análisis detallado del acople geométrico, apoyado en principios de tolerancias dimensionales, comportamiento de materiales y cumplimiento normativo (ISO 3601), complementado con pruebas funcionales, ciclos de dispensado y ensayos de estanqueidad, tanto para modelos funcionales como defectuosos.

En términos económicos, el análisis se apoya en datos concretos de los costos relacionados con la atención postventa. Resolver una disfunción mediante rediseño validado no sólo contribuye a la calidad del producto, sino que incide directamente en indicadores clave de desempeño operativo. La convergencia entre evidencia técnica, viabilidad económica y

posibilidad de replicabilidad industrial fortalece la pertinencia del trabajo como aporte integral a la mejora continua del sistema productivo.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Eliminar el defecto funcional de goteo en el ensamble entre la válvula dispensadora y el espigo del tanque de agua, mediante un rediseño geométrico que corrija la interferencia dimensional existente y cuya efectividad sea validada bajo condiciones funcionales reales.

### **Objetivos Específicos**

Caracterizar el defecto funcional observado en el ensamble válvula-espigo, documentando su ocurrencia, condiciones de aparición y relación con la geometría de los componentes.

Comparar dimensionalmente los espigos existentes, entre modelos defectuosos y funcionales, mediante análisis metrológico y visualización técnica de la zona de interferencia.

Diseñar una nueva geometría del espigo que elimine la interferencia con la válvula, asegurando la correcta ubicación del o-ring y un ajuste sellante confiable.

Validar experimentalmente el nuevo diseño mediante pruebas funcionales de goteo, ensayos de presión y análisis visual, comprobando la ausencia de fuga bajo condiciones controladas.

## Marco Teórico y Referencial

### Sellado Industrial y Sistemas de Válvulas

El sellado industrial es un componente esencial en los sistemas de conducción de fluidos, cuya función primordial es prevenir fugas, preservar la presión interna y garantizar la seguridad operativa de los equipos. En aplicaciones industriales, los dispositivos de sellado deben soportar condiciones extremas de presión, temperatura, vibraciones y agentes químicos agresivos (Sridhar et al., 2019). El desempeño de estos sistemas está directamente vinculado al tipo de uniones, la geometría de las interfaces y el material de los elementos sellantes.

Las válvulas, por su parte, son mecanismos de control de flujo presentes en la mayoría de los sistemas de transporte de líquidos y gases. Su correcto funcionamiento depende, entre otros factores, de la calidad del acoplamiento entre los elementos mecánicos y del sistema de sellado que evita el paso indeseado de fluido. Las fallas de sellado en válvulas pueden derivar en pérdidas económicas considerables, afectaciones a la calidad del producto e incluso riesgos de seguridad (Yang et al., 2021).

Dentro de los dispositivos de sellado más empleados se encuentran los O-rings, empaques de elastómero con sección transversal circular que se comprimen entre superficies, generando una barrera contra el paso del fluido. Su eficacia depende en gran medida de su correcta ubicación geométrica y del diseño del alojamiento (housing) en el que son insertados (Li & Zhang, 2020).

El conjunto válvula-espigo constituye una unión crítica dentro de los sistemas dispensadores de agua, ya que cualquier deficiencia dimensional o desviación en el montaje puede comprometer el sello. Investigaciones recientes han destacado que interferencias no controladas, tolerancias excesivas o desplazamientos fuera de especificación generan

condiciones de goteo persistente, especialmente bajo ciclos repetitivos de uso (Morimoto et al., 2018).

Estudios como los de Holgado, et al., (2022) han demostrado que las principales causas de falla en el sellado de válvulas industriales se asocian con deficiencias en la alineación geométrica, pérdida de elasticidad de los O-rings, incompatibilidad entre materiales y errores de diseño en el perfil de alojamiento. De ahí la importancia de considerar el sellado no solo como un componente aislado, sino como un sistema integrado donde convergen criterios mecánicos, materiales y funcionales.

En el contexto de manufactura de productos plásticos por soplado, como tanques dispensadores de agua, el reto es aún mayor, ya que los procesos de conformado pueden inducir deformaciones térmicas y geométricas que afectan la zona de contacto entre piezas. En estos casos, la validación funcional del sistema de sellado debe considerar condiciones reales de montaje y operación, incluyendo variaciones en el torque de ajuste, presión interna y temperatura de trabajo (Wang et al., 2023).

### **Tipos de O-Rings, Materiales y Normas Técnicas (ASTM, ISO)**

Los O-rings son elementos de sellado ampliamente utilizados en sistemas de ingeniería debido a su diseño simple, bajo costo y alta efectividad cuando se emplean en condiciones adecuadas. Su geometría circular permite generar un sellado bidireccional al ser comprimidos entre dos superficies, formando una barrera eficaz contra el paso de fluidos o gases (Parker Hannifin Corporation, 2007).

Los materiales más comunes para la fabricación de O-rings incluyen elastómeros como nitrilo (NBR), etileno propileno dieno monómero (EPDM), fluorocarbono (FKM, conocido comercialmente como Viton®), silicona, poliuretano y perfluoroelastómeros (FFKM), cada uno

con propiedades específicas según la resistencia térmica, química y mecánica requerida (Hoffmann et al., 2016). La selección del material adecuado depende de variables como el medio a sellar, la temperatura de operación, la presión del sistema y la compatibilidad química.

El comportamiento del O-ring bajo carga depende no solo de sus propiedades intrínsecas, sino también del diseño de su alojamiento (housing). La norma ISO 3601-1:2012 define las dimensiones internas, secciones transversales y tolerancias permitidas para O-rings métricos, mientras que normas ASTM como la ASTM D1414 regulan los métodos de prueba para evaluar propiedades físicas como dureza, elongación, resistencia a la tracción y compresión (ASTM International, 2011).

Una ubicación incorrecta del O-ring, la falta de lubricación, o la presencia de rebabas o defectos en el canal de alojamiento, pueden inducir fallas prematuras como extrusión, corte, aplastamiento asimétrico o deformación permanente. En el caso de aplicaciones dinámicas o donde hay ensamblajes repetitivos, es esencial validar el comportamiento del material bajo ciclos de carga realistas (Kirk & Williamson, 2012).

La literatura técnica resalta que para aplicaciones en contacto con agua potable, el EPDM es ampliamente utilizado por su compatibilidad química, resistencia al envejecimiento y cumplimiento con normativas de sanidad. No obstante, su desempeño depende en gran medida del diseño geométrico del alojamiento, que debe permitir una deformación controlada del elastómero para asegurar su retorno elástico (ISO 3601-1:2012; ASTM D2000).

### **Interferencia Dimensional y Tolerancias Críticas**

En sistemas de ensamble mecánico, la interferencia dimensional se refiere a la relación geométrica entre dos componentes que deben acoplarse, generalmente a presión o por ajuste, para generar una unión funcional. Esta interferencia puede ser positiva (ajuste forzado), nula

(ajuste exacto) o negativa (juego), dependiendo de los valores relativos entre las dimensiones nominales y las tolerancias de fabricación (Shigley et al., 2015). En aplicaciones de sellado, como aquellas que involucran O-rings, una interferencia mal calibrada puede comprometer la integridad del sello, incluso si el diseño teórico parece adecuado.

Las tolerancias críticas, por su parte, se definen como aquellas dimensiones cuya variabilidad, aunque mínima, puede afectar directamente el funcionamiento, ensamblaje o desempeño del producto. Estas tolerancias están ligadas al diseño funcional y deben ser establecidas de acuerdo con normativas de calidad y manufactura como las de la serie ISO 286-1 para ajustes y tolerancias (ISO, 2010). La correcta selección de estas tolerancias es fundamental para asegurar la reproducibilidad del ensamblaje y evitar defectos como fugas, deformaciones o fallas mecánicas.

El comportamiento mecánico en un sistema de acople con O-ring depende del juego o interferencia entre la superficie interna de la válvula y el espigo del tanque. Aunque este principio se ha mencionado en apartados anteriores (2.1 y 2.2), aquí se enfatiza desde la óptica del diseño dimensional, sin entrar aún en consideraciones de validación. Según DeVries (2017), incluso pequeñas desviaciones en el diámetro externo del espigo o el interno de la válvula pueden provocar un contacto desigual sobre el O-ring, induciendo esfuerzos de corte o zonas de fuga.

Para un diseño robusto, se recomienda que la interferencia dimensional esté dentro de un rango funcional que garantice una compresión controlada del O-ring (normalmente entre el 20 % y el 30 % de su sección transversal), sin inducir sobrecompresión ni permitir juego libre (Parker Hannifin Corporation, 2007). La geometría del alojamiento también debe contemplar los radios

de transición, el acabado superficial y la alineación, factores que inciden directamente en el éxito del ensamble.

El marco normativo respalda esta necesidad de precisión. La norma ISO 286-2 establece las clases de ajuste recomendadas para diferentes tipos de acoples, mientras que normas como la ASME Y14.5 definen criterios de tolerancia geométrica para manufactura y control dimensional (ASME, 2018). Estas guías son claves para anticipar fallos dimensionales antes de la validación funcional del diseño.

### **Costos de No Calidad (CNQ) y Service Call Rate (SCR)**

En contextos de manufactura industrial, los Costos de No Calidad (CNQ) representan el conjunto de gastos asociados a productos o procesos que no cumplen con los estándares establecidos de desempeño o calidad. Estos costos incluyen tanto componentes visibles como ocultos, y abarcan desde reprocesos, desperdicios y devoluciones, hasta pérdidas de reputación y disminución en la satisfacción del cliente (Juran & Godfrey, 1999). Dentro del marco del control de calidad total, los CNQ se clasifican comúnmente en cuatro categorías: costos de prevención, costos de evaluación, costos por fallas internas y costos por fallas externas (Campanella, 1999).

El Service Call Rate (SCR), por su parte, es un indicador clave utilizado en industrias con componentes de posventa o soporte técnico. Se define como la proporción de productos vendidos que requieren una intervención técnica o reclamo posterior por parte del cliente. En sistemas con acoples críticos como válvula-espigo, un SCR elevado puede ser un síntoma directo de problemas de diseño o de control dimensional deficiente (Pyzdek & Keller, 2014).

La relación entre el SCR y los CNQ es directa: un aumento en el SCR suele correlacionarse con un incremento en los costos por fallas externas, dado que implica desplazamiento de personal técnico, reposición de componentes, gestión logística y, en muchos

casos, afectación de la percepción de calidad por parte del usuario final. Según un estudio de Antony et al., (2017), la atención técnica postventa puede llegar a representar entre el 15 % y el 40 % del costo total de la no calidad en productos de consumo masivo.

En el caso de acoples sellantes, como los analizados en sistemas de dispensado, las fallas de interferencia dimensional que derivan en goteo o fugas aumentan significativamente la probabilidad de que un cliente exija servicio técnico, lo cual impacta directamente sobre el SCR. Investigaciones aplicadas al sector de plásticos técnicos (Rudolph, 2020) han demostrado que pequeñas desviaciones geométricas pueden multiplicar por tres el índice de reclamaciones, incluso en lotes con control estadístico aparente.

La norma ISO 9004 (2018) sugiere que las organizaciones midan los CNQ no solo en valores absolutos, sino también en relación con indicadores de desempeño como el SCR, para facilitar la priorización de acciones correctivas. Esto permite trazar mapas de correlación entre fallas funcionales y costos económicos, integrando la información en modelos de mejora continua como Six Sigma o DMAIC.

Por otro lado, algunas investigaciones recientes en entornos industriales complejos avanzados, indican que la visibilidad de los costos por fallas externas —como el SCR— puede inducir decisiones de rediseño técnico más efectivas que los análisis exclusivamente internos. Por ejemplo, en un análisis realizado por Gijo y Scaria (2019) en una planta de componentes hidráulicos, la simple reducción del SCR en un 0,02 generó un ahorro anual de más de \$150.000 USD, con una inversión en rediseño de apenas el 4 % de esa cifra.

## Herramientas de Calidad y Análisis de Causa Raíz

El análisis de causa raíz (RCA) es fundamental en la fase *Analizar* del ciclo DMAIC al abordar fallas técnicas de fabricación y ensamblaje. Dos herramientas ampliamente utilizadas en ingeniería de manufactura son el diagrama de Ishikawa y la técnica de los 5 porqués:

El diagrama de Ishikawa (o espina de pescado) estructura causas potenciales en categorías como materia prima, método, maquinaria, mano de obra, medición y medio ambiente, facilitando un análisis sistemático de defectos (Antony et al., 2017; Amrina & Firmansyah, 2019). Se utiliza para mapear hipótesis de falla, pero requiere validación adicional mediante datos o pruebas.

La técnica de los 5 porqués, originaria del sistema de producción Toyota, profundiza en la cadena causa–efecto hasta identificar el origen del defecto. Barsalou & Starzyńska (2023) observaron que su uso efectivo requiere acompañamiento con métodos empíricos como verificación documental, inspecciones o pruebas específicas.

La efectividad combinada de ambas herramientas ha sido demostrada en contextos similares. En la manufactura de O-rings, Amrina & Firmansyah (2019) documentaron una reducción del 0.67 % al 0.83 % en la tasa de defectos tras aplicar RCA estructurado con Ishikawa y 5 porqués dentro de DMAIC.

Complementariamente, es necesario integrar herramientas estadísticas conocidas como los 7 básicos de calidad: hojas de verificación, diagramas de Pareto, histogramas, gráficos de control, diagramas de dispersión, estratificación y hojas de clasificación (Montgomery & Johnson, 2019). Estas herramientas permiten cuantificar la frecuencia, severidad y distribución de fallas, aportando evidencia objetiva a los hallazgos del RCA.

Por ejemplo, un estudio de Fähy et al. (2022) mostró que en líneas de ensamble de plásticos técnicos, el uso de Pareto y control de proceso junto con diagrama de Ishikawa permitió priorizar correctamente los errores de acople geométrico, reduciendo los defectos en un 30 % sólo en la fase de diagnóstico.

### **Metodología DMAIC Aplicada a Manufactura**

DMAIC, propio del enfoque Six Sigma, ha probado ser efectivo en manufactura para enfrentar variaciones críticas en componentes y procesos. Este apartado se centra en su valor técnico-conceptual, integrando herramientas estadísticas e ingenieriles que fortalecen la toma de decisiones.

**Definir:** Se identifica el defecto funcional como desviación de lo "crítico para la calidad" (CTQ), con foco en sus consecuencias sobre producto y cliente.

**Medir:** Se enfatiza la confiabilidad de los datos mediante sistemas validados (R&R) y estudios de capacidad (Cp, Cpk), según Montgomery (2020).

**Analizar:** Se integran herramientas como Ishikawa, ANOVA y regresión para relacionar variabilidad dimensional con fallos funcionales (Sokovic et al., 2009).

**Mejorar:** Se promueve un rediseño basado en validaciones experimentales y control de riesgos (Antony et al., 2016).

**Controlar:** Se normaliza el éxito mediante SPC, instrucciones técnicas y seguimiento estadístico (Brue & Launsby, 2003).

Este abordaje no se limita a resolver fallas, sino que genera conocimiento reproducible sobre la relación entre diseño, tolerancia y funcionalidad.

## Estudios Similares y Referentes Internacionales

Numerosos estudios en la última década reportan casos donde desviaciones dimensionales críticas forzaron modificaciones de diseño en conjuntos tipo válvula-espigo, al comprometer el ajuste, el sellado o el acoplamiento mecánico previstos. Este fenómeno suele manifestarse ya sea como interferencias excesivas (provocando atascos, desgaste prematuro o imposibilidad de montaje) o, en el caso opuesto, holguras indebidas (con fugas o pérdida de precisión en el control del fluido). Por ejemplo, Lanes (2018) destaca que variaciones de apenas milésimas de pulgada en componentes críticos pueden desajustar la compresión de sellos estáticos (como O-rings) y alterar un ensamble originalmente estanco. Dichos desvíos acumulados de tolerancias pueden incrementar la fricción interna o liberar rutas de fuga, como se ha observado en obturadores con guías (plug & cage) que sufrieron rozamiento excesivo por interferencias, o en válvulas reparadas con piezas replicadas fuera de especificación.

Sheth & George (2016) reportaron que una planitud insuficiente en las superficies de asiento de una válvula de retención tipo dual plate, debido a variaciones en el proceso de fresado, resultó en fugas notorias durante las pruebas de hermeticidad. Esto obligó a re-trabajos y ajustes del proceso de maquinado para lograr la tolerancia requerida, demostrando que incluso desviaciones geométricas sutiles pueden traducirse en fallos funcionales en servicio, particularmente cuando se relacionan con tolerancias cerradas en componentes de sellado.

En el sector aeroespacial, Safran documentó en 2019 un problema crónico de ensamble en una línea de mandos que usaban pines de 4.7625 mm insertados en orificios con interferencia. Se identificó una tasa de rechazo del 16 %, lo que generaba pérdidas por retrasos y reprocesos. Para mitigar la interferencia, se rediseñó el utillaje de montaje y se adoptó un proceso de inserción en frío mediante enfriamiento criogénico del pin, lo cual permitió reducir la

variabilidad dimensional y elevar el índice de capacidad del proceso por encima de  $Cpk = 1.33$  (Díaz, 2020).

Otro caso relevante fue reportado por Tolcap (s.f.) en un sistema de solenoide inteligente de combustible, donde el apilamiento de tolerancias provocaba interferencias y desviaciones fuera de especificación en la carrera del émbolo. El rediseño eliminó componentes problemáticos y reajustó tolerancias, logrando un  $Cpk \geq 1.33$ , lo que redujo el costo anual de fallos de \$6 millones a menos de \$6 mil.

En el ámbito de dispositivos médicos, Forefront Medical Technology (2019) documentó el reemplazo de componentes metálicos por plásticos de alta precisión en una válvula de succión para endoscopios. Las primeras piezas plásticas presentaron desviaciones sutiles (descentramientos, ovalidad) que provocaban fugas. Se rediseñó el molde incorporando insertos maquinados y acabados de precisión por electroerosión (EDM), logrando tolerancias de  $\pm 3 \mu m$  y eliminando completamente las fugas.

Los casos analizados dejan en evidencia cómo decisiones de diseño aparentemente marginales, como tolerancias de micras, pueden desencadenar impactos operativos significativos. Por ello, integrar criterios rigurosos de ingeniería dimensional desde las primeras fases de desarrollo no es solo recomendable, sino indispensable en sistemas donde el ajuste define el rendimiento funcional.

### **Fenómenos Análogos de Interferencia Funcional en Otros Dominios Técnicos**

La interferencia funcional provocada por desviaciones geométricas o por incompatibilidades entre componentes mecánicos no es exclusiva del sector industrial. Este fenómeno, caracterizado por el desacoplamiento entre diseño esperado y comportamiento real bajo condiciones operativas, tiene paralelos notables en dominios como la biomecánica, la

microfluídica y la robótica de precisión, donde pequeñas desviaciones dimensionales pueden generar fallos significativos. Estudiar estos paralelos permite comprender con mayor profundidad los mecanismos implicados y enriquecer el abordaje ingenieril con lógicas transdisciplinarias.

En biomecánica, por ejemplo, los implantes articulares deben replicar con alta fidelidad las superficies de contacto del cuerpo humano. Un desajuste de apenas 100  $\mu\text{m}$  puede generar pérdida de movilidad, fricción anómala o inflamación crónica (Muratoglu et al., 2003). En algunos casos, se ha reportado que desviaciones angulares mínimas en la colocación del implante acetabular alteran la distribución de cargas, afectando el comportamiento funcional del conjunto (Scholes & Unsworth, 2010). Esta situación guarda analogía directa con el fallo por interferencia en sistemas válvula-espigo, donde desviaciones micrométricas impiden el asentamiento correcto del o-ring, alterando la distribución de presiones y provocando fugas.

Un segundo dominio análogo es la microfluídica, donde se manipulan volúmenes extremadamente pequeños de líquido mediante canales y válvulas microscópicas. En este campo, un cambio dimensional menor al 5 % puede bloquear el flujo o modificar la presión interna del sistema, afectando la funcionalidad completa del dispositivo (Whitesides, 2006).

Un caso crítico es el de las válvulas neumáticas de membrana en chips de diagnóstico médico, donde la interferencia entre capa flexible y sustrato rígido requiere tolerancias de fabricación inferiores a 2  $\mu\text{m}$  para garantizar el cierre completo del canal (Unger et al., 2000). Esta precisión revela un paralelismo técnico con los sistemas de sellado industriales, donde el aplastamiento controlado del o-ring es esencial.

En robótica de precisión, particularmente en manipuladores quirúrgicos o brazos para ensamblaje de microcomponentes, se presentan fallos por interferencia cuando los acoples

rotacionales no mantienen la concentricidad esperada. Estudios como el de Lee et al. (2014) muestran que un descentramiento axial de 20  $\mu\text{m}$  en las juntas de un brazo robótico puede inducir errores de trayectoria superiores a 1 mm en el extremo de trabajo. El origen: interferencia geométrica en el acoplamiento de los rodamientos, resuelta mediante rediseño de alojamientos y recalibración dimensional. Este tipo de solución, centrada en ajustes geométricos finos, es análoga a la estrategia adoptada en el rediseño del espigo industrial estudiado.

Incluso en la ingeniería de materiales compuestos, se han observado interferencias estructurales causadas por orientaciones angulares fuera de especificación en fibras de refuerzo, lo que interfiere con la consolidación del laminado. Esto puede generar zonas de delaminación o bolsas de aire, comparables funcionalmente a fugas o zonas de pérdida de estanqueidad (Abrate, 1998). Para mitigar estos efectos, se rediseñan las máquinas de posicionamiento automático, asegurando control geométrico estricto durante el tendido.

La interferencia funcional no es una anomalía aislada, sino un fenómeno transversal que emerge cuando el diseño no logra anticipar las condiciones reales de operación. Integrar este tipo de conocimiento en la fase de rediseño permite establecer criterios técnicos más robustos y prever fallos antes de su aparición. Es precisamente esta convergencia entre disciplinas lo que transforma una mejora local en una solución con alcance sistémico.

## **Diseño Metodológico**

### **Naturaleza y Enfoque de la Investigación**

#### ***Tipo de Investigación: Aplicada, Técnica y Funcional***

Este estudio se inscribe dentro del campo de la investigación aplicada, con un enfoque eminentemente técnico y funcional. Se orienta a resolver un problema específico identificado en un entorno de manufactura real, mediante el uso de herramientas analíticas y procedimientos propios de la ingeniería industrial. La intervención no parte de un marco teórico abstracto, sino de una necesidad operativa concreta, y busca aportar una solución validable en condiciones reales de producción.

La unidad de análisis corresponde a un sistema productivo definido, donde se identifican variables críticas de calidad asociadas a una disfunción funcional en el ensamble de componentes. Estas variables son susceptibles de ser medidas con precisión y analizadas estadísticamente para tomar decisiones técnicas sobre el proceso. La intervención se lleva a cabo directamente sobre el sistema, sin modificar su entorno ni introducir condiciones experimentales artificiales.

Desde el punto de vista del diseño metodológico, se plantea una lógica de análisis cuantitativa de tipo correlacional-explicativa. Se busca establecer relaciones entre parámetros físicos relevantes (como el diámetro del espigo, el comportamiento de sellado y la presión de trabajo), con el fin de esclarecer causas técnicas del defecto observado y evaluar alternativas de rediseño. Las relaciones causales propuestas no emergen de hipótesis estadísticas formales, sino de análisis técnicos previos y observaciones de campo, que serán contrastados mediante medición y verificación funcional.

Este enfoque asegura que las decisiones técnicas se fundamenten en evidencia cuantificable, vinculada con desviaciones geométricas reales, desempeño funcional observado y métricas operativas clave como el SCR. El propósito central es desarrollar un rediseño geométrico que elimine el defecto funcional de goteo entre válvula y espigo, mediante una solución técnica reproducible, que mantenga consistencia bajo condiciones reales de ensamblaje y contribuya a una mejora verificable en la calidad del producto final.

### ***Diseño Cuasi-Experimental de Campo***

La naturaleza del fenómeno estudiado exige un diseño que permita intervenir directamente sobre el sistema sin descontextualizar ni alterar sus condiciones operativas reales. Por esta razón, se adopta un enfoque cuasi-experimental de campo, en el que no se recurre a grupos de control ni a condiciones de laboratorio, sino que se trabaja sobre el sistema en su entorno de funcionamiento habitual.

Este diseño metodológico se justifica porque el defecto funcional que se busca corregir (goteo en el ensamble válvula-espigo) no puede ser replicado con fidelidad en un entorno simulado, ya que depende de variables como las tolerancias dimensionales reales, el comportamiento del material bajo presión y el ensamblaje manual en línea. La intervención se realiza sobre unidades reales del sistema productivo, lo que permite observar directamente el impacto de las modificaciones propuestas en condiciones representativas de uso.

No se establece un grupo comparativo externo porque el análisis se realiza sobre diferentes configuraciones técnicas del mismo componente, antes y después del rediseño, permitiendo una evaluación pre-post con base en criterios funcionales medidos. Se parte de un conjunto de observaciones y registros de fallas en campo, se caracterizan las condiciones de

aparición del defecto, y se evalúa la efectividad de la intervención mediante ensayos técnicos y pruebas funcionales directas.

Este enfoque mantiene la validez externa de los resultados y asegura que las conclusiones extraídas tengan aplicabilidad directa en el proceso. El nivel de control sobre las variables es parcial, pero suficiente para establecer relaciones técnicamente significativas y validar la efectividad del rediseño sin alterar el sistema ni introducir condiciones artificiales que comprometan la utilidad de la solución propuesta.

### ***Lógica Operativa Basada en Evidencia***

La toma de decisiones técnicas en este estudio se fundamenta en evidencia directa, recolectada en condiciones reales de operación. No se parte de supuestos teóricos ni de simulaciones ideales, sino del análisis de datos medidos, patrones funcionales observados y registros de desempeño del sistema. Esta orientación permite identificar con claridad las variables críticas implicadas en el defecto funcional, y sustentar cada intervención con base en información verificable.

Las relaciones causales que estructuran el rediseño del sistema surgen del análisis técnico de mediciones dimensionales, comportamiento funcional en campo y documentación de fallas. A partir de estos elementos se trazan rutas de intervención fundamentadas en la experiencia empírica del proceso, más que en inferencias hipotéticas.

Cada modificación propuesta en la geometría del espigo responde a un ciclo de verificación concreta: se diseña, se prueba en condiciones operativas reales y se valida su eficacia mediante ensayos funcionales. De esta forma, el rediseño final no constituye una hipótesis de mejora, sino una solución técnicamente confirmada, con impacto directo sobre la reducción de fallas y la confiabilidad del ensamblaje.

### ***Unidad de Análisis: Sistema Válvula-Tanque***

La unidad de análisis seleccionada corresponde al ensamblaje funcional entre el espigo del tanque de agua y la válvula dispensadora, delimitado a partir de la manifestación repetida de un defecto técnico: el goteo visible en condiciones normales de operación. Este defecto ha sido identificado tanto en reportes de campo como en auditorías internas del proceso, y está vinculado directamente a interferencias geométricas entre los componentes. Se trata, por tanto, de una unidad delimitada por evidencia funcional, no por abstracción conceptual.

La elección de esta unidad se fundamenta en tres criterios metodológicos: (1) la trazabilidad empírica del defecto dentro del proceso productivo, (2) la posibilidad de intervenir directamente sobre sus dimensiones y tolerancias, y (3) su impacto económico y operativo, medido a través de indicadores como el Service Call Rate (SCR) y los costos asociados a no calidad. Se excluyen expresamente del análisis otros elementos del sistema de dispensación (como el cuerpo de la válvula, la tapa o el mecanismo de apertura), ya que no participan en la interacción directa que genera la fuga.

Este subconjunto funcional presenta una composición técnica específica: espigos cilíndricos de material plástico, o-rings de sellado con comportamiento elástico, y superficies de contacto ajustadas por presión axial. La disfunción observada se manifiesta bajo condiciones reales de uso: ciclos de apertura y cierre del dispensador, exposición a presiones internas del sistema, y desplazamiento del o-ring por desalineación o interferencia. Esta especificidad funcional permite operar con variables medibles, como el diámetro exterior del espigo, la profundidad del alojamiento del o-ring y el ángulo de inserción.

La delimitación del sistema válvula-tanque como unidad metodológica de análisis permite integrar con precisión datos de medición dimensional, análisis de interferencia y pruebas

de validación funcional, sin diluir el enfoque técnico. Asimismo, proporciona una base concreta para el rediseño geométrico y la verificación de mejoras, al permitir una comparación controlada entre configuraciones defectuosas y soluciones propuestas en condiciones operativas equivalentes.

## **Marco de Intervención Técnica**

### **Estructura Híbrida: DMAIC + Protocolo Técnico de Manufactura**

La intervención metodológica se fundamenta en una estructura híbrida que articula el ciclo DMAIC como eje de razonamiento técnico-operativo y un protocolo técnico de manufactura desarrollado a partir de las condiciones reales del entorno productivo. Esta integración no se limita a un marco teórico, sino que permite desplegar acciones verificables, documentadas y alineadas con las decisiones efectivas de planta.

El ciclo DMAIC proporciona el ordenamiento lógico del proceso de resolución: se delimita el problema, se recogen y analizan datos técnicos, se formula un rediseño sobre parámetros medibles, y se controla su comportamiento postintervención. El protocolo de manufactura complementa este marco al incorporar criterios explícitos de ensamblabilidad, ajustes tolerados, puntos críticos de inspección y condiciones funcionales para la liberación del nuevo diseño. Esta combinación permite que cada fase del ciclo no solo sea comprensible desde la ingeniería, sino también ejecutable desde la planta.

### **Articulación con el Sistema SAIC y Decisiones Reales de Planta**

El desarrollo metodológico se implementa en articulación directa con el Sistema de Aseguramiento Interno de Calidad (SAIC), desde el cual se originó la alerta técnica inicial por goteo y se gestionó la trazabilidad del defecto en las plataformas internas. Esta coordinación permite que cada avance metodológico esté respaldado por bitácoras de inspección, actas de seguimiento, registros de reclamaciones postventa y decisiones autorizadas por los responsables de calidad. No se trata de un desarrollo externo a la planta, sino de una intervención acoplada al circuito formal de mejora continua institucional.

La génesis del estudio proviene del SCR (Service Call Rate), indicador que alertó sobre el aumento de reclamaciones por goteo en el sistema válvula-tanque. Esta señal fue reforzada por revisiones en campo, auditorías funcionales y análisis metrológicos. La propuesta de intervención se construyó, por tanto, como respuesta técnica integrada al circuito de decisiones de calidad, y sus resultados deberán ser aprobados, documentados e incorporados dentro del sistema SAIC como mejora oficial.

### **Flujo Lógico: Diagnóstico → Rediseño → Estabilización**

La intervención se organiza en un flujo progresivo de tres fases conectadas: diagnóstico, rediseño y estabilización. Este recorrido no replica el ciclo DMAIC, sino que reconfigura su aplicación en función del caso específico y la secuencia técnica validada en planta.

La fase de diagnóstico se orienta a caracterizar el defecto de goteo desde una perspectiva geométrica y funcional. Incluye inspecciones directas, análisis dimensionales entre piezas funcionales y defectuosas, revisión de tolerancias y herramientas de causa raíz que permiten aislar la interferencia responsable del fallo. Aquí no se aplican hipótesis formales, sino suposiciones técnicas verificables.

El rediseño se construye a partir del diagnóstico validado. Se plantea una nueva configuración geométrica del espigo, se definen condiciones de contacto con el o-ring, y se especifican rangos dimensionales que garanticen sellado sin interferencia. Esta propuesta se materializa en un nuevo molde y se prueba en condiciones funcionales simuladas antes de su incorporación.

La estabilización implica la validación estadística de los resultados funcionales del rediseño, la inclusión formal del nuevo diseño en el protocolo de manufactura, y su liberación

dentro del flujo productivo. Esta fase cierra el proceso metodológico con una solución técnica evaluada en campo, operativa y replicable desde la perspectiva de calidad.

## Arquitectura Metodológica por Fases

### Fase de Definición

#### *Delimitación Funcional del Defecto*

Esta fase se enfoca en establecer los límites técnicos del defecto funcional observado en el ensamble válvula-tanque. La delimitación no se restringe a una descripción superficial del goteo, sino que lo posiciona como una disfunción operativa con impacto verificable en calidad, postventa y percepción del cliente. El defecto se define como una fuga sistemática de agua en el punto de acople entre el espigo del tanque y la válvula dispensadora, asociada a un contacto inadecuado del o-ring debido a interferencias geométricas específicas.

La identificación del defecto surge del análisis de servicio técnico (Service Call Rate - SCR), reportes de garantía y revisión directa en planta, lo que permite establecer una frontera técnica clara entre funcionamiento normal y disfunción. Esta delimitación opera como base para las decisiones de intervención y para la formulación de herramientas de análisis posteriores.

#### *Herramientas: Tabla “Es / No es”, Mapa de Proceso, Evaluación de Detección, Pareto*

Para acotar el problema con precisión y evitar desvíos durante la intervención, se emplean herramientas de especificación funcional y jerarquización de fallos. La tabla "Es / No es" permite establecer los atributos técnicos observables del defecto, separando aquello que define su comportamiento real de lo que podría ser confundido con otros problemas del sistema.

El mapa de proceso se utiliza para identificar la etapa específica del flujo de ensamblaje donde el defecto se manifiesta o amplifica, facilitando la revisión cruzada de operaciones, componentes y controles. Esto permite visualizar puntos potenciales de intervención y ajustar los parámetros operativos sin necesidad de modificar el sistema completo.

La evaluación de detección se basa en inspecciones funcionales de línea y registros de posventa. Se documentan los métodos actuales de identificación del defecto y su efectividad, con el fin de establecer un umbral mínimo de sensibilidad para cualquier mejora futura. Finalmente, se incorpora un diagrama de Pareto con base en el análisis de reportes SCR, que permite priorizar el goteo como defecto crítico frente a otras fallas secundarias del sistema válvula-tanque.

***Acción inmediata: Firewall Proveedor y Revisión 100 %***

Como medida temporal de contención y mientras se desarrolla el rediseño definitivo, se implementa una acción inmediata basada en un firewall de proveedor. Esta medida consiste en establecer una barrera de inspección exhaustiva en la entrada de componentes, asegurando que sólo los espigos funcionales ingresen a la línea de ensamble. La revisión se ejecuta al 100 % de las piezas, a través de pruebas funcionales básicas que permitan identificar aquellos componentes que presenten indicios de interferencia o deformación en el punto de contacto con el o-ring.

Este firewall no representa una solución permanente, sino una estrategia transitoria que permite reducir el volumen de reclamos y estabilizar el sistema mientras se desarrollan y validan las propuestas de rediseño. Esta decisión se toma en coordinación con el área de calidad de planta y se documenta como parte del registro técnico del proceso.

**Fase de Medición**

***Construcción de Línea Base Técnica***

La fase de medición se orienta a establecer una línea base técnica verificable que permita cuantificar el comportamiento dimensional del sistema válvula-tanque en su estado actual. Esta línea base no se construye como un promedio genérico, sino como un sistema de referencia

funcional que diferencia entre subconjuntos de piezas funcionales y defectuosas, en función de su desempeño en campo.

La selección de muestras responde a criterios de clasificación operativa documentados por el Sistema de Aseguramiento Interno de Calidad (SAIC), e incluye unidades provenientes tanto del circuito postventa (casos de goteo) como del inventario de piezas funcionales con desempeño validado. A cada pieza se le aplica un protocolo de inspección dimensional que contempla mediciones de diámetro, tolerancia, longitud del cuello, ubicación del o-ring y presencia de rebabas, con el fin de capturar la geometría de contacto entre espigo y válvula.

Esta línea base se construye no sólo como evidencia descriptiva, sino como punto de partida para las fases siguientes del análisis y rediseño. Sirve como condición de contorno para modelar interferencias y proyectar nuevos ajustes geométricos.

#### ***Validación instrumental: Gage R&R, Vector Loop, Matrices de Medición Directa***

La validez de las mediciones realizadas se asegura mediante la aplicación de un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R), ejecutado sobre los instrumentos utilizados y los operarios asignados. Este estudio confirma que las mediciones obtenidas no están sesgadas por el dispositivo ni por el operador, y permite confiar en los datos como base técnica para el rediseño. Los resultados del Gage R&R se documentan y se mantienen como anexo técnico de respaldo.

Complementariamente, se emplea la herramienta de Vector Loop para analizar cómo las tolerancias acumuladas en distintas superficies afectan el punto crítico de contacto entre el o-ring y la válvula. Esta herramienta permite proyectar interferencias geométricas en escenarios de producción masiva y evaluar su sensibilidad ante variaciones menores en el proceso.

Las mediciones directas se organizan en matrices que separan piezas funcionales y defectuosas, permitiendo una visualización comparativa de las variaciones. Estas matrices incluyen códigos de pieza, fecha de producción, referencia dimensional exacta, valores de mediciones y observaciones funcionales relevantes. La organización matricial de los datos permite la trazabilidad de cada medición y su vinculación con comportamientos observados en planta.

## **Fase de Análisis**

### ***Estudio de Interferencia y Causa Raíz***

La tercera fase del proceso metodológico se orienta a identificar la causa raíz del defecto funcional mediante un análisis técnico centrado exclusivamente en la zona de interferencia entre la válvula y el espigo. Se prescinde de cualquier conjetura o interpretación indirecta: la observación parte de mediciones instrumentales y comparaciones verificables en piezas reales. El objetivo es aislar con precisión el desajuste dimensional que provoca la disfunción funcional identificada como goteo.

El foco operativo se sitúa en la zona crítica de acoplamiento: el diámetro del espigo y su interacción con la cavidad de la válvula y el comportamiento del o-ring. Se emplean criterios funcionales de ajuste, estanqueidad y ensamblabilidad como base para construir una lógica comparativa entre elementos funcionales y defectuosos. Toda hipótesis que no pueda ser sostenida mediante evidencia física directa es descartada. La lógica del análisis parte de datos obtenidos en la fase de medición y permite esclarecer el papel geométrico del espigo como agente causal del defecto.

### ***Herramientas: Gráficas, Ishikawa, 5 Porqués, Correlación SCR – Diámetro***

Esta etapa incorpora herramientas visuales, causales y estadísticas, aplicadas con el propósito de clarificar relaciones técnico-funcionales y sustentar decisiones de rediseño posteriores:

Gráficas de dispersión, histogramas y superposiciones geométricas permiten visualizar la distribución de diámetros del espigo y su vinculación con el estado funcional de las unidades inspeccionadas.

El diagrama de Ishikawa estructura las posibles causas del defecto dentro de categorías técnicas específicas (diseño, método, material, ensamblaje), excluyendo factores genéricos o no verificables.

La técnica de los cinco porqués permite profundizar de forma secuencial en la cadena causal desde el síntoma operativo (goteo) hasta la raíz geométrica del problema.

La relación entre el Service Call Rate (SCR) y el diámetro del espigo se analiza como un cruce técnico orientado a identificar correspondencias funcionales. Se establece el SCR como variable dependiente y el diámetro como variable independiente, bajo el supuesto operativo de que una reducción en la interferencia dimensional conlleva una disminución en la recurrencia de fallos. Aunque la información disponible no permite construir un modelo estadístico robusto ni establecer una inferencia cuantitativa concluyente, sí se identifican patrones técnicos consistentes en la transición de diámetros (de 19.65 mm a 20.38 mm), los cuales se documentan como eje de decisión técnica para la etapa de rediseño.

Estas herramientas no son abordadas como fórmulas metodológicas abstractas ni como un requisito formal del análisis, sino como instrumentos que permiten, con base en datos observables y relaciones técnicamente significativas, trazar el puente operativo hacia la fase de

rediseño. Cada una se aplica de manera situada, conectando las particularidades del sistema con decisiones verificables que permitan corregir el defecto funcional desde su causa geométrica.

## **Fase de Mejora**

### ***Rediseño Técnico del Espigo (Molde – Plano – Validación)***

Esta fase aborda directamente la modificación geométrica del componente que actúa como agente causal del defecto funcional identificado: el espigo del tanque. El proceso de mejora no parte de un rediseño especulativo, sino de una reconfiguración dimensional que responde a datos previamente verificados, observaciones funcionales en campo y comparaciones técnicas con unidades sin defecto.

El nuevo diseño se construye a partir del registro dimensional obtenido en la fase de medición, estableciendo una configuración geométrica que elimina la interferencia negativa con la cavidad de la válvula y asegura la posición funcional del o-ring. Se incorporan principios de tolerancia geométrica y ensamblaje funcional para definir el nuevo plano técnico, que sirve como base para la fabricación del nuevo molde de inyección.

El molde se construye a partir de este plano técnico optimizado, evitando ajustes empíricos no controlados que alteren la fidelidad entre el diseño propuesto y el componente producido. Esta decisión permite asegurar la trazabilidad del rediseño y la correspondencia dimensional entre el modelo y las piezas fabricadas. Una vez producido, se validan las primeras unidades obtenidas mediante comparación directa con los especímenes funcionales usados como referencia, documentando su comportamiento a través de pruebas de ajuste, hermeticidad y ensamblaje.

***Herramientas: RPP, Confirmación Funcional, Liberación Elemento 14***

RPP (Revisión Previa a la Producción): Se aplica como herramienta de verificación estructurada antes de autorizar el molde para producción en serie. Esta revisión contempla la validación geométrica, el ajuste con la válvula en condiciones reales de ensamblaje, y la verificación de los criterios de estanqueidad definidos previamente. Su función es actuar como barrera técnica intermedia para prevenir la liberación de un diseño que, si bien es nuevo, podría no resolver el defecto en condiciones reales. No sustituye los mecanismos posteriores de aseguramiento de calidad previstos en la etapa de control.

Confirmación Funcional: Se realiza mediante ensayos directos de hermeticidad con agua, manipulación operativa del sistema y observación del comportamiento en condiciones equivalentes a las de uso final. No se recurre a simulaciones ni sustituciones experimentales, sino a pruebas tangibles en contexto. La validación se establece con base en la ausencia de goteo en ciclos múltiples de apertura y cierre, la estabilidad del o-ring, y la facilidad de ensamblaje sin herramientas adicionales.

Liberación del Elemento 14: Se refiere a la validación técnica final del nuevo componente, designado internamente como espigo del tanque en la nomenclatura de ingeniería de producto. Esta liberación implica que el nuevo diseño ha sido técnicamente habilitado para su incorporación formal al sistema de producción y ensamblaje, sujeto al cumplimiento de los criterios funcionales establecidos en fases previas. La documentación técnica, los planos y las observaciones de validación quedan registrados como soporte para su adopción definitiva.

## **Fase de Control**

### ***Integración del Rediseño al Sistema Productivo***

Esta fase tiene como propósito garantizar que el nuevo diseño del espigo, una vez validado funcionalmente, sea incorporado de forma sistemática y sostenible dentro del sistema productivo. No se trata de una simple sustitución de piezas, sino de una integración formal al flujo operativo de manufactura, que preserve los logros técnicos alcanzados durante la fase de mejora.

La incorporación del nuevo espigo implica actualizar los procedimientos de trabajo asociados, los planos de referencia, los parámetros de inspección y los criterios de aceptación de calidad. Este proceso se ejecuta bajo una lógica de control preventivo, que busca evitar la reintroducción de errores previamente corregidos, mediante mecanismos de aseguramiento integrados al ciclo de producción.

Adicionalmente, se articula la trazabilidad del nuevo componente con el sistema de gestión de calidad de la empresa, asegurando que los datos asociados a su desempeño funcional sean monitoreados, documentados y analizados con regularidad. Esto permite establecer un ciclo de retroalimentación continua, desde el uso en planta hasta la detección temprana de desviaciones.

### ***Herramientas: Plan de control, Trabajo Estándar, Score Card (SAIC)***

Plan de Control: Define los puntos críticos de inspección y los métodos para verificar que el nuevo espigo cumple con los requisitos dimensionales y funcionales establecidos. Incluye frecuencia de muestreo, métodos de medición, responsables y criterios de reacción ante no conformidades. Este plan actúa como barrera sistemática para mantener la estabilidad del rediseño.

Trabajo Estándar: Se actualiza el instructivo de ensamblaje, integrando los cambios derivados del nuevo diseño, en especial aquellos relacionados con la posición del o-ring, el ángulo de inserción y la aplicación de fuerza durante el acoplamiento. Esta herramienta permite que el rediseño no dependa de habilidades individuales, sino de procedimientos repetibles.

*Score Card* (SAIC): Se incorporan indicadores técnicos del nuevo espigo al sistema Score Card de la planta, particularmente en la categoría de Calidad. Esto permite monitorear su desempeño en tiempo real, correlacionarlo con otras variables del sistema y activar alertas si se presentan desviaciones en campo. La inclusión en el SAIC (Sistema de Aseguramiento Integrado de Calidad) formaliza su seguimiento dentro de la cultura de mejora continua de la organización.

Esta fase no sólo formaliza el cierre técnico de la intervención, sino que la arraiga en la dinámica operativa de la planta, como una solución que se sostiene por mérito propio. El control implementado permite que el aprendizaje generado permanezca activo en la línea de producción, sin depender de vigilancia constante o de condiciones extraordinarias, sino como parte del nuevo estándar desde el cual se fabrica, se evalúa y se mejora.

### **Técnicas e Instrumentos**

La sección que se desarrolla a continuación establece las herramientas técnicas y metodológicas que estructuran la validación, el rediseño y el control del sistema válvula-tanque en contexto industrial. Todas las técnicas e instrumentos aquí descritos se aplican en las fases de análisis, medición, rediseño e implementación, sin anticipar los resultados, sino conformando el soporte técnico que los posibilita.

### ***Técnicas de Medición Física y Dimensional***

Se emplean técnicas de metrología dimensional de precisión basadas en captura tridimensional sin contacto y verificación directa mediante instrumentos de contacto. Estas técnicas permiten evaluar, con confiabilidad metrológica, las dimensiones críticas del espigo, el diámetro del alojamiento del o-ring, el asiento de sellado y las posibles desviaciones en componentes asociados al sistema válvula-tanque.

La medición sin contacto se lleva a cabo mediante escaneo 3D, técnica que posibilita la captura de geometrías complejas con alta resolución y exactitud volumétrica. Las mediciones por contacto directo complementan esta técnica en diámetros internos y espesores críticos, y se utilizan adicionalmente para la verificación de ajustes posteriores al mecanizado.

#### ***Instrumentos: Escáner 3D HandyScan, Calibre, Matrices Excel***

El escáner empleado corresponde al modelo HandySCAN BLACK™ | Elite, instrumento de grado metrológico certificado bajo norma VDI/VDE 2634 parte 3 e ISO 10360. Este dispositivo ofrece una exactitud de hasta 0,012 mm y una velocidad de adquisición de 1.8 millones de puntos por segundo. Su fuente de luz incorpora 30 líneas láser azules, lo cual incrementa su tolerancia al brillo superficial y su aplicabilidad en entornos industriales activos.

La resolución de malla de 0,1 mm, su portabilidad (peso de 0,94 kg) y su compatibilidad con software de ingeniería inversa e inspección (Geomagic, PolyWorks, Inventor, entre otros) lo convierten en una herramienta versátil y de alta confiabilidad para el registro preciso de geometrías. Esta elección responde directamente a la necesidad de registrar piezas metálicas con tolerancias ajustadas, en un contexto donde el desmontaje total puede no ser viable.

Como instrumento complementario se utiliza un calibre digital calibrado con resolución de 0,01 mm, empleado principalmente para validar espesores, diámetros y profundidades en

componentes estándar de la válvula y su sistema de acople. El instrumento ha sido verificado contra bloques patrón y se mantiene bajo control metrológico interno.

Las matrices Excel se estructuran como repositorios de datos primarios, orientadas al almacenamiento, depuración y análisis preliminar de variables geométricas y dimensionales. Se desarrollan plantillas especializadas de validación con trazabilidad por ensayo, facilitando el análisis estadístico posterior y la replicabilidad del proceso.

### ***Técnicas de Análisis Causal y Estadístico***

El análisis causal incorpora métodos para explorar el comportamiento de fallos y relaciones técnicas dentro del sistema válvula-tanque. Se aplica el diagrama de Ishikawa para agrupar variables críticas según categorías funcionales y de proceso. Se utiliza además el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE/FMEA), permitiendo identificar puntos vulnerables de acuerdo con su severidad, ocurrencia y capacidad de detección.

En el componente estadístico, se emplean medidas descriptivas (media, mediana, desviación estándar) y pruebas de distribución para caracterizar la dispersión y forma de los datos recolectados. Además, se calculan índices de capacidad de proceso ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ ) y se monitorean indicadores de calidad como el SCR (Service Call Rate), en coherencia con el objetivo de disminuir la incidencia de fallos de válvula en campo.

Como parte del aseguramiento del sistema de medición, se ejecuta un estudio Gage R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad) bajo lineamientos MSA del AIAG. Este estudio incluye múltiples operadores, piezas y repeticiones, y se respalda en análisis de Minitab con resultados trazables en archivos adjuntos. Su implementación valida la precisión del sistema de medición frente a la variabilidad inherente del proceso y permite cuantificar la proporción de error atribuible al instrumento y al factor humano.

### ***Validación Funcional en Línea (Proceso Real no Intervenido)***

Se incorpora una técnica de validación funcional directa basada en la observación empírica del sistema en condiciones reales de operación. Este procedimiento no interviene el entorno ni altera sus variables, permitiendo observar con fidelidad la interacción del sistema válvula-tanque bajo condiciones industriales de presión, caudal y montaje en sitio.

El proceso incluye documentación fotográfica, registro visual y reporte estructurado de eventos relevantes, permitiendo la identificación de fallos sin alterar la dinámica operativa del sistema. Esta validación funcional se configura como herramienta instrumental y no como resultado, facilitando la toma de decisiones de rediseño fundamentadas en evidencia de planta.

El protocolo de observación se basa en principios de no interferencia y trazabilidad técnica en campo. Si bien las gráficas de comportamiento del proceso se administran mediante el sistema SAIC (Sistema de Administración Integral de Calidad), bajo supervisión del área de Tecnología e Información de la sede central en México, se accede a reportes consolidados del sistema a través del personal técnico autorizado. Esto permite contrastar las observaciones con datos operativos sin comprometer la integridad del monitoreo corporativo ni infringir restricciones de confidencialidad. Se valida, por tanto, la pertinencia de conservar esta sección como técnica indirecta de verificación funcional, dada su utilidad como insumo empírico para el rediseño.

### **Indicadores de Evaluación Técnica y Económica**

Esta sección consolida los instrumentos técnicos utilizados para monitorear el comportamiento del sistema válvula–tanque antes, durante y después de la modificación dimensional, sin incluir interpretaciones de resultado. Cada indicador descrito corresponde a una herramienta de análisis técnico aplicada de forma operativa durante el desarrollo del estudio.

### ***Capacidad del Proceso: Cp y Cpk***

Se utilizan los índices Cp y Cpk como parámetros estadísticos de evaluación técnica del proceso de manufactura. Cp representa la capacidad potencial del proceso en relación con los límites de especificación, mientras que Cpk incorpora además el desplazamiento respecto al valor nominal.

Ambos se calculan sobre las variables críticas del espigo y el alojamiento del o-ring, utilizando los datos extraídos de las matrices de medición física. El análisis se realiza en Minitab sobre datos consolidados y depurados, como parte de la caracterización técnica del comportamiento dimensional del sistema intervenido.

### ***Nivel Sigma***

El nivel sigma constituye un parámetro de análisis que estima la probabilidad de que una unidad presente no conformidad respecto a las especificaciones. Se utiliza como herramienta de control estadístico para interpretar la dispersión de los datos medidos, sin emitir juicios de desempeño. El cálculo se realiza con base en el total de unidades y en los límites de especificación dimensional definidos para las piezas clave.

El procedimiento técnico considera el enfoque DPMO (Defectos por Millón de Oportunidades) y su conversión a niveles sigma, de acuerdo con las convenciones de ingeniería de calidad. Este análisis se ejecuta en paralelo con las pruebas de capacidad del proceso y se documenta en reportes técnicos trazables.

### ***SCR Pre y Post Implementación***

El Service Call Rate (SCR) se incorpora como parámetro cuantitativo de seguimiento funcional, determinado por la relación entre el número de servicios técnicos registrados y el volumen total de unidades distribuidas en campo.

El procesamiento del SCR en esta sección no responde a proyecciones o análisis de impacto, sino a la construcción técnica de una línea base. Los datos provienen de reportes sistemáticos desde la plataforma SAIC, filtrados por códigos específicos de falla y validados según trazabilidad técnica. Se omite cualquier juicio sobre desempeño o mejora.

### ***Costo de no Calidad y Ahorro Económico Proyectado***

El indicador "Costo de No Calidad" (CONC) se emplea como herramienta operativa para identificar los componentes económicos involucrados en fallos funcionales del sistema válvula-tanque, sin extenderse en análisis de causalidad o proyección de impacto. Se consideran ítems como reprocesos, servicios técnicos, reposición de piezas, pérdidas por ineficiencia operativa y costos asociados a incumplimientos de garantía.

La estimación del CONC se realiza mediante consolidación de valores históricos registrados en reportes técnicos y económicos internos, con base en protocolos corporativos. Se incorpora adicionalmente una matriz comparativa de costos por unidad afectada, soportada por los informes de costos operativos disponibles en el archivo del proyecto.

Ambos indicadores –SCR y CONC– se integran a los análisis técnicos como instrumentos de control y soporte a decisiones de mejora, sin asumir un rol evaluativo o proyectivo en esta etapa documental.

## Consolidación Técnica del Rediseño e Implementación

### Alternativas Evaluadas

Durante la fase de análisis del proyecto se evaluaron distintas alternativas para abordar el defecto funcional de goteo en el sistema de acople válvula-espigo. Estas alternativas surgieron del análisis causa-efecto (diagrama de Ishikawa) y fueron filtradas según su grado de incidencia, viabilidad de modificación y alineación con las restricciones operativas del entorno real de manufactura.

El proceso consideró tanto factores geométricos como de interacción físico-material, especialmente relacionados con el o-ring como elemento crítico de sellado. Las principales alternativas analizadas se organizan a continuación según el componente implicado. La Figura 1 presenta el diagrama de Ishikawa elaborado en esta investigación, en el que se identificaron múltiples posibles causas del defecto de goteo en el sistema válvula-espigo, clasificadas en seis categorías.

Aunque algunas variables allí consignadas fueron descartadas por su baja incidencia o estabilización previa en planta (como el tipo de tanque, iluminación o condiciones de medición), el diagrama fue clave para identificar patrones de recurrencia y orientar el análisis dimensional posterior. Por su parte, la Figura 2 representa un esquema seccionado del sistema válvula-espigo, indicando la localización geométrica exacta de las variables X1a, X2b y X3b, seleccionadas como críticas tras el proceso de descarte técnico y validación funcional. Esta lectura cruzada entre causalidad sistémica (véase Figura 1) y geometría operativa (véase Figura 2) permitió construir una ruta lógica de depuración de alternativas hasta llegar a las variables con impacto verificable en la zona de sellado del o-ring.

### ***Válvula (X1)***

X1a: Diámetro del canal del o-ring fuera de especificación. Si bien los análisis dimensionales mostraron ligeras variaciones, estas se encontraban dentro de tolerancias aceptables y no explicaban por sí solas la recurrencia del defecto. Se descartó como causa raíz, pero se mantuvo como consideración para asegurar compatibilidad en el rediseño. Su localización en el esquema de sección corresponde al extremo de acople de la válvula, tal como se indica en la Figura 2.

X1b: Ubicación incorrecta del o-ring. Casos puntuales de montaje incorrecto fueron identificados, pero no representaban una causa sistémica. Esta variable fue clasificada como esporádica y no fue incluida en las acciones de rediseño.

### ***Tanque (X2)***

X2a: Diámetro del espigo fuera de especificación. Aunque se detectó dispersión dimensional entre unidades, no todos los casos con desviación presentaban fuga, lo que limitó su utilidad como predictor confiable del defecto. Se reconoció como una fuente secundaria de variabilidad, complementaria al rediseño, pero sin convertirse en foco central de intervención.

X2b: Diferencias geométricas entre plataformas Andrómeda y Polar. Esta diferencia estructural en el diseño de espigos se identificó como una causa directa de incompatibilidad con la válvula, generando interferencias en la zona del o-ring. Su recurrencia, relevancia estadística y repercusión funcional la posicionaron como eje central del rediseño geométrico. En la Figura 2, se visualiza como la región de acople entre el espigo del tanque y la válvula, evidenciando interferencia directa.

### ***Ensamble (X3)***

X3a: Método de ensamble válvula-tanque. Se evidenció que variaciones en la fuerza de inserción y en los dispositivos usados podían modificar la posición final del o-ring. No obstante, la estandarización del método escapaba al alcance del rediseño geométrico, por lo que se recomendó como mejora de proceso a nivel operativo, sin ser incluida en la propuesta técnica.

X3b: Cantidad de vaselina aplicada en el espigo. La lubricación insuficiente o excesiva alteraba la trayectoria de inserción del o-ring, incidiendo directamente en la aparición del goteo. Si bien no podía abordarse mediante rediseño geométrico, se documentó como factor crítico de operación y se incluyó en las recomendaciones para el plan de control posterior. La interferencia que puede provocar esta lubricación inadecuada se representa en la zona de contacto mostrada en la Figura 2.

### ***Secuencia de Selección y Enfoque Adoptado***

La delimitación progresiva de variables se realizó mediante análisis dimensional, validaciones funcionales, registros históricos y cruce de plataformas tecnológicas, lo cual permitió integrar evidencia estadística, física y operacional. A partir del análisis de causa-efecto mostrado en la Figura 1, se descartaron variables sin incidencia significativa, como cambios en el material del tanque, iluminación del puesto de trabajo o condiciones de medición, por no presentar correlación funcional o por tratarse de factores ya estabilizados en planta. El enfoque se centró en variables con impacto verificable sobre la geometría de acople y el comportamiento del o-ring, integrando criterios de compatibilidad entre plataformas, deformación inducida y dinámica de sellado. Esta lectura cruzada con el vector loop permitió priorizar técnicamente las zonas con mayor implicación funcional.

### Definición de Tres Elementos Estratégicos

X1a: Aunque no fue una causa raíz, su margen de tolerancia se integró al rediseño para garantizar compatibilidad cruzada con válvulas existentes.

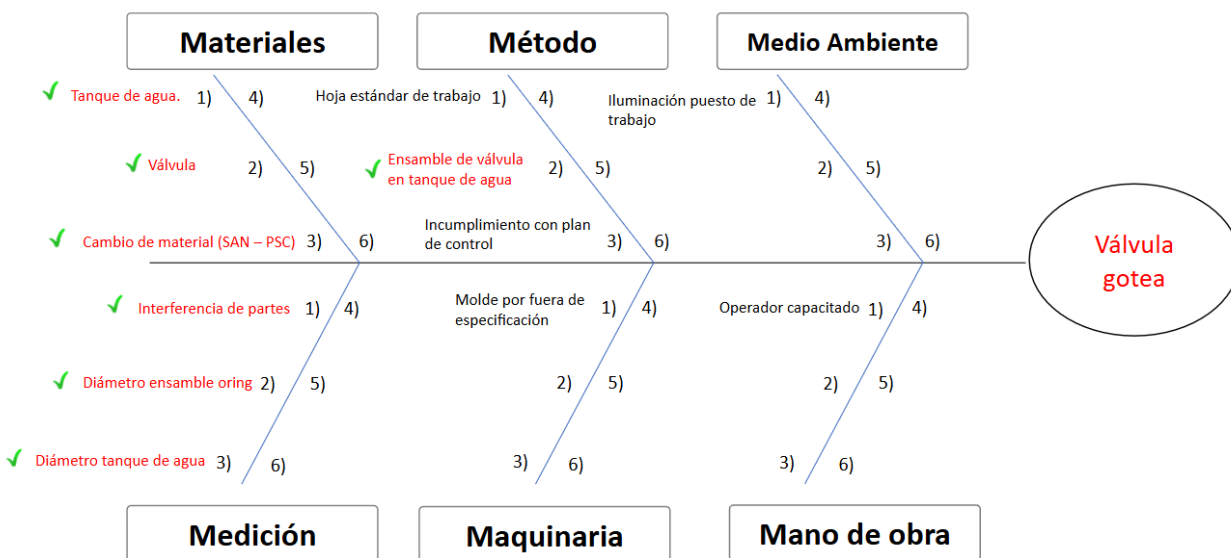
X2b: Se asumió como el punto crítico del rediseño, orientando la generación de una nueva geometría de espigo con criterios unificados entre plataformas.

X3b: Se estableció como variable de control operativo, requiriendo ajustes en los procedimientos de aplicación de vaselina durante el ensamblaje.

La selección final de alternativas respondió a criterios técnicos, logísticos y de sostenibilidad industrial, articulando la solución geométrica con condiciones reales de operación y asegurando la trazabilidad funcional del rediseño en planta

### Figura 1

Diagrama de Ishikawa del sistema válvula-espigo



Nota

. Figura Elaboración propia como parte del presente trabajo de investigación. Resume las causas potenciales del goteo organizadas por categorías técnicas clave derivadas del análisis de causa-efecto. *Fuente.* Autoría propia.

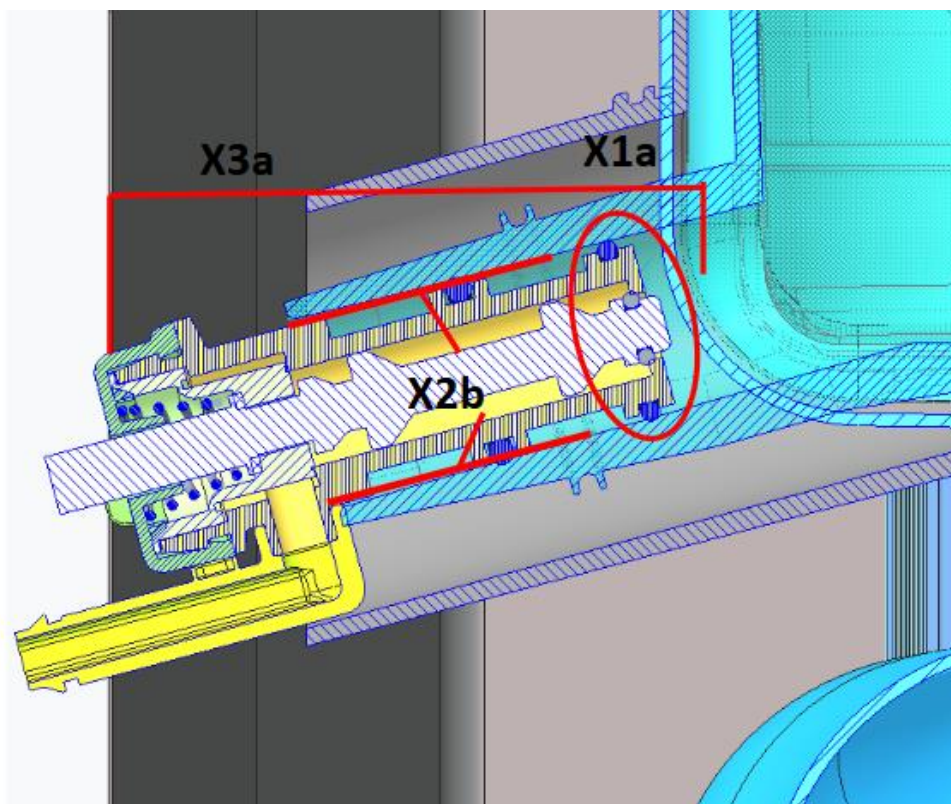
### **Selección Técnica de la Solución Final**

La selección técnica de la solución definitiva se consolidó a partir del análisis exhaustivo de las variables críticas identificadas en la fase anterior, integrando criterios de compatibilidad geométrica, comportamiento funcional en planta y sostenibilidad operativa del rediseño. El proceso de decantación de alternativas se guió por el árbol de fallas mostrado en la Figura 3, el cual estructura jerárquicamente las posibles causas del defecto de goteo y permite rastrear lógicamente la ruta hacia la solución viable.

El nodo central del árbol representa el defecto funcional observable: fuga de agua en la interfaz válvula-espigo. A partir de allí, se bifurcan las ramas que corresponden a subcomponentes potencialmente responsables (válvula, espigo, o-ring, procedimiento de ensamblaje), y a su vez estas se subdividen según mecanismos específicos de falla. Esta organización permitió delimitar la convergencia de factores en un mismo punto geométrico: la zona de asiento del o-ring en el espigo, cuya interferencia dimensional con la válvula fue evidenciada tanto en el análisis metrológico como en los ensayos funcionales.

**Figura 2**

*Esquema seccionado del sistema válvula-espiga con indicación de las variables críticas evaluadas*



Nota. X1a, X2b y X3b. Figura elaboración propia a partir de modelo CAD generado para este estudio. Muestra las zonas geométricas intervenidas a partir de la selección técnica basada en recurrencia del defecto y validación funcional. *Fuente.* Autoría propia.

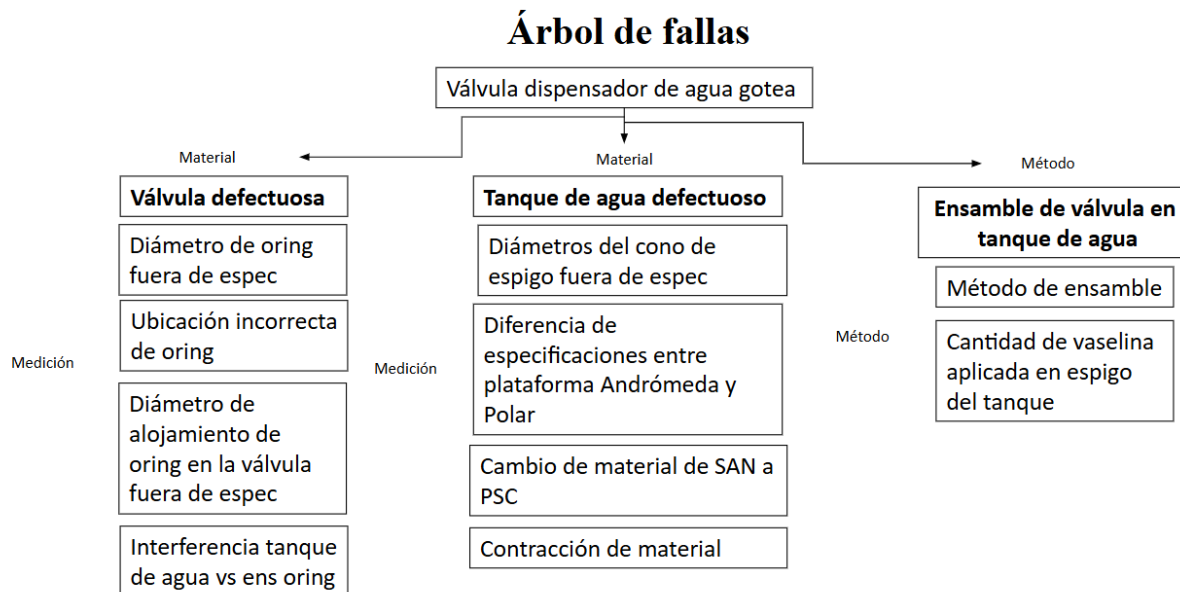
Los datos obtenidos a través del análisis estadístico en Minitab, cruzando Cp, Cpk, SCR y límites de especificación, confirmaron que la variable X2b (diferencia geométrica entre plataformas Andrómeda y Polar) representaba el nodo crítico con mayor impacto en la

ocurrencia del goteo. La diferencia dimensional entre ambas plataformas se evidenció en el diámetro del orificio central del espigo, no en la base ni en los extremos, lo cual es clave para el ajuste del o-ring. Este diámetro se cuantificó en 19,65 mm para el modelo defectuoso y 20,32 mm para el modelo rediseñado. Esta variación crítica fue confirmada mediante el informe metrológico LMMD-ID-159-22 (véase Apéndice B) del laboratorio certificado, y constituye el punto de interferencia corregido con la nueva geometría.

La solución seleccionada consistió en el rediseño integral del espigo del tanque, unificando las especificaciones dimensionales entre plataformas. El nuevo perfil asegura la ubicación correcta del o-ring, evitando interferencias y garantizando un sello funcional estable. Esta propuesta fue validada en condiciones reales de funcionamiento y documentada con trazabilidad técnica, alineándose con los criterios de la metodología DMAIC: definición clara del problema, medición precisa, análisis causal riguroso, mejora geométrica implementada y control verificado.

### **Figura 3**

*Árbol de fallas del sistema válvula-espigo*



Nota. Elaboración propia como parte del presente trabajo de investigación. Resume el proceso de análisis causal estructurado que condujo a la selección de la solución final mediante depuración técnica progresiva. *Fuente.* Autoría propia.

### Fabricación del Nuevo Molde

La implementación del rediseño geométrico requirió la fabricación de un nuevo molde para el espigo del tanque de agua, a fin de estandarizar su compatibilidad dimensional y eliminar la interferencia con la válvula. Según la cotización técnica N.º 4182 (véase Apéndice C), el costo total de fabricación fue de \$10.472.000 COP, incluyendo el impuesto al valor agregado (IVA). El tiempo estimado de ejecución fue de 8 días calendario, considerando los procesos de mecanizado, ajuste, prueba de molde y verificación dimensional previa a su liberación.

Desde el enfoque de ingeniería de manufactura, esta inversión es marginal en comparación con los costos acumulados asociados a la atención de solicitudes de servicio técnico provocadas por el defecto. De acuerdo con el histórico de reportes en la región, se identificaron 187.042 unidades distribuidas en Colombia durante el último año, con un total de 88 reclamos

por goteo atribuibles a la falla en el sistema válvula-espigo, lo que representa un SCR (Service Call Rate) del 0,05. El costo promedio por intervención fue de \$44 USD, sumando un total de \$3.872 USD anuales sólo en esta región.

A nivel internacional, Ecuador reportó un SCR de 0,02 con 21 casos y un costo unitario de \$55 USD, mientras que Perú y la operación CEAM (Centro de Ensamble y Almacenamiento de Mabe) presentaron SCR de 0,01 y 0,02 respectivamente, con 5 y 21 servicios técnicos registrados, y costos promedio de \$50 y \$35 USD. Estos datos arrojan un costo agregado de \$6.012 USD por servicios correctivos vinculados al defecto durante el mismo periodo (véase Figura 4).

#### Figura 4

*Análisis comparativo de SCR y costos de servicio técnico por país*

	COL	ECU	PERU	CEAM	SCR TOTAL (Bait)	SCR TOTAL (take out)
SCR	0,05	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02
EXPUESTOS	187042	111958	57110	111958		
SERVICIO	88	21	5	21		
COSTO UND \$USD	\$ 44,00	\$ 55,00	\$ 50,00	\$ 35,00		
COSTO UND \$USD	\$ 3.872,00	\$ 1.155,00	\$ 250,00	\$ 735,00		

Total	Total
\$ 6.012,00	\$ 26.452.800,00
USD	COL

Nota. Elaboración propia a partir de reportes técnicos y cotizaciones internas. Resume el comportamiento del SCR por país y su relación con los costos de intervención, evidenciando el impacto económico directo del defecto en la operación regional. *Fuente.* Autoría propia.

Cabe subrayar que estas cifras corresponden exclusivamente a los costos directos de intervención técnica, sin contemplar el impacto indirecto asociado a deterioro de la imagen corporativa, sobrecarga en los centros de servicio, logística de devoluciones, pérdida de fidelización del cliente y costos de oportunidad por desviación operativa. En este contexto, la fabricación del nuevo molde constituye una solución técnica de alta efectividad y bajo costo relativo, con potencial para reducir drásticamente la reincidencia del defecto.

Desde el punto de vista de gestión de costos industriales, la decisión se justifica plenamente por su relación costo-beneficio favorable, alineada con los principios de calidad del diseño y prevención de fallas en origen. El rediseño, al ser replicable en todas las líneas de producción involucradas, permite uniformar el estándar de manufactura, mitigar la variabilidad entre plataformas (Andrómeda y Polar) y consolidar la eficiencia del proceso global.

### **Instalación del Rediseño en Línea de Producción**

Una vez completado el proceso de rediseño geométrico y validación dimensional del espigo Andrómeda, se procedió a la instalación del nuevo molde directamente en la línea de producción. Esta acción permitió sustituir la configuración anterior del molde defectuoso, que presentaba interferencias con la válvula, por una versión optimizada que cumple con los requerimientos funcionales y de ensamblaje.

El cambio implicó la implementación física de las modificaciones en la geometría del espigo, las cuales se resumen en la siguiente tabla comparativa:

**Tabla 1**

*Comparativo dimensional del espigo Andrómeda antes y después del rediseño*

<b>Ubicación / Geometría</b>	<b>Valor (in)</b>	<b>Valor (mm)</b>	<b>Valor (in)</b>	<b>Valor (mm)</b>
	<b>Antes</b>	<b>Antes</b>	<b>Después</b>	<b>Después</b>
Espigo Andrómeda / diámetro Ø	0.705	17.89	0.686	17.41
Grosor de brida	1.875	47.62	1.874	47.60

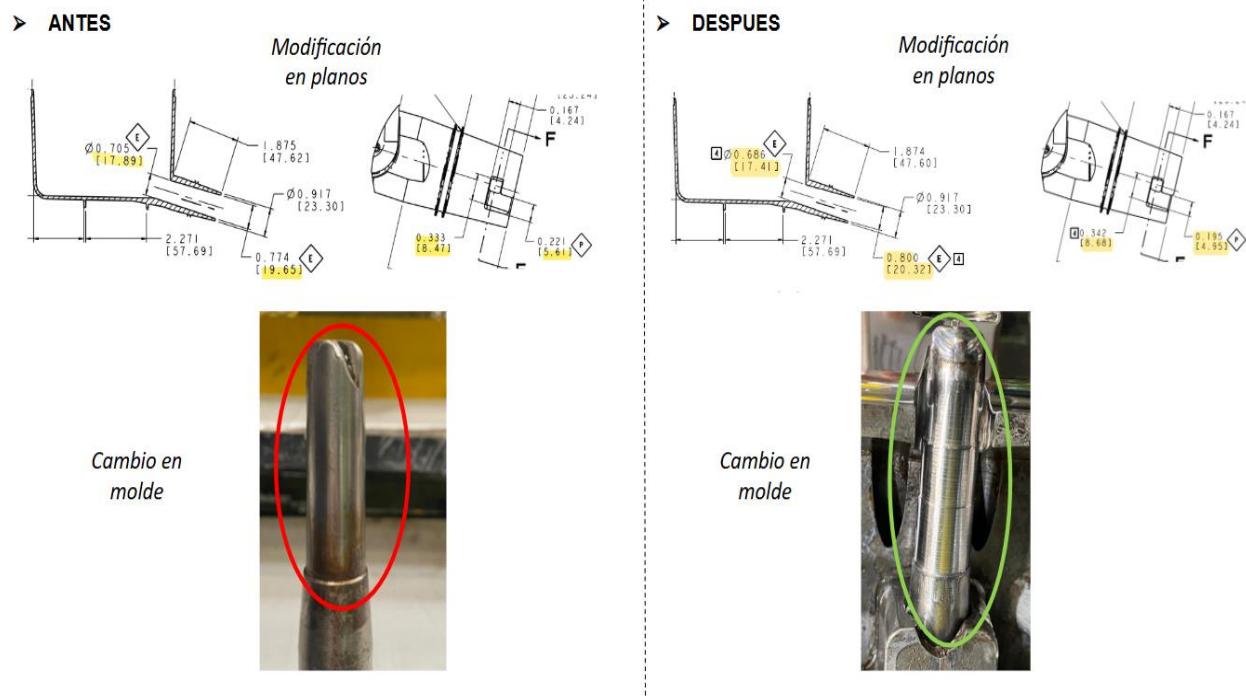
Diámetro Ø interior del espigo	0.917	23.30	0.917	23.30
Orificio medio (centro) / diámetro Ø	0.774	19.65	0.800	20.32
Saliente lateral / longitud	0.333	8.47	0.342	8.68
Saliente lateral / grosor menor	0.221	5.61	0.195	4.95

---

Nota. Las diferencias dimensionales, aunque milimétricas, son determinantes para asegurar el correcto acoplamiento con la válvula, eliminar interferencias mecánicas y reducir las reincidencias de fallas por goteo. Estas modificaciones no sólo responden a tolerancias funcionales críticas, sino que también permiten la estandarización entre plataformas, al ser compatibles con las líneas Andrómeda y Polar. *Fuente.* Autoría propia.

### **Figura 5**

*Comparativo técnico y visual del espigo antes y después del rediseño geométrico*



Nota. Se observa la modificación precisa de los planos de diseño y su reflejo en el componente físico. A la izquierda, el molde original con el espigo defectuoso; a la derecha, el nuevo molde instalado, evidenciando una mejora en acabado, alineación y ajuste. Elaboración propia con base en planos de ingeniería y registros fotográficos de instalación. *Fuente.* Autoría propia.

La instalación del nuevo molde se realizó sin incidencias, bajo condiciones controladas, y fue verificada en línea mediante inspección dimensional, validación visual del ajuste con válvula y prueba funcional. Esta intervención marcó el cierre de la fase de rediseño y la entrada en operación del nuevo estándar, con monitoreo continuo en las primeras unidades fabricadas para garantizar estabilidad en el proceso de manufactura.

### Protocolo de Prueba y Control Operativo

Una vez culminada la instalación del nuevo molde en línea de producción (Sección 4.4), se diseñó e implementó un protocolo riguroso de prueba y control para verificar el desempeño del espigo rediseñado en condiciones reales de uso. Esta fase tuvo como propósito consolidar la

eficacia funcional, confirmar la eliminación de fallas estructurales y descartar cualquier variable externa que pudiera incidir en los eventos de goteo.

El protocolo incluyó cuatro frentes operativos interdependientes:

Validación de goteo en entorno controlado.

Evaluación de bordes y rebabas post-moldeo.

Auditoría del ensamblaje en planta.

Control estadístico del desempeño en franjas horarias.

Cada uno de estos elementos fue abordado con metodología propia y triangulado con evidencia fotográfica, inspección directa y registros de planta. La siguiente figura resume el primer frente:

### **Figura 6**

*Pruebas funcionales de validación de goteo con trampa de papel craft*



Nota. Las imágenes muestran el montaje de trampas de absorción colocadas en el piso y sobre el dispensador del refrigerador, durante los ciclos de dispensado con agua coloreada. En estas pruebas se alcanzaron más de 5.280 ciclos sin evidencia de goteo, lo cual confirmó la eficacia del rediseño. *Fuente.* Autoría propia.

Paralelamente, se inspeccionaron los espigos moldeados directamente desde la línea para identificar la presencia de rebabas o filos que pudieran causar fugas o riesgos en el montaje manual:

## Figura 7

### *Evaluación de rebabas y filos cortantes*

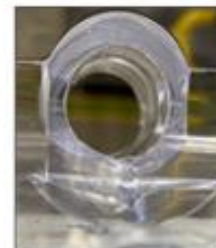
#### ➤ Presencia de rebaba



#### Retirar rebaba



#### ➤ Prueba de filos cortantes

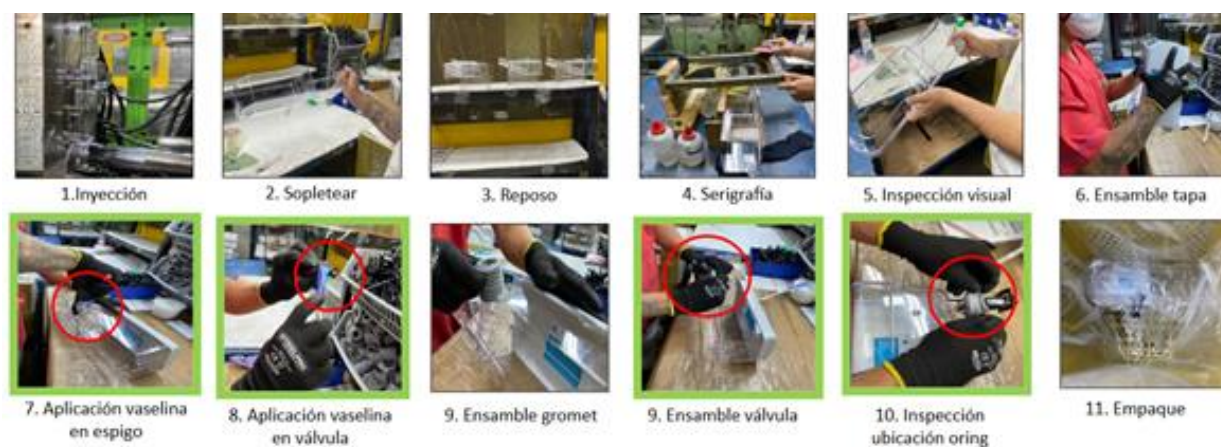


Nota. Se identificó rebaba interna en el espigo moldeado (resaltada con flechas azules) y se corrigió manualmente. Las imágenes también muestran la ejecución de la prueba de contacto con una superficie blanda recubierta de cinta para verificar filos cortantes. Se concluyó que el rediseño eliminó el riesgo de cortes accidentales durante el ensamblaje. *Fuente.* Autoría propia.

Se ejecutó una auditoría visual y secuencial del proceso de ensamblaje para identificar desviaciones en la manipulación, lubricación o acople que pudieran incidir en el comportamiento del espigo:

## Figura 8

### *Secuencia operativa de ensamblaje*



Nota. Esta figura ilustra todo el proceso de manufactura desde la inyección hasta el empaque.

Los recuadros rojos destacan las etapas críticas: aplicación de vaselina en el espigo y en la válvula, ensamblaje del gromet, inserción de válvula y colocación precisa del o-ring. Estas

variables fueron descartadas como origen del goteo, tras múltiples pruebas de control. *Fuente.*  
Autoría propia.

Finalmente, se realizó un monitoreo estadístico por bloques horarios durante un ciclo extendido de cuatro días (viernes a lunes), con el fin de detectar patrones de reincidencia, errores humanos o defectos por variabilidad de turno. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Registro de incidencias por franja horaria y día de control (código de prueba: 12 = sin incidencias)*

<b>Hora</b>	<b>Viernes</b>	<b>Sábado</b>	<b>Domingo</b>	<b>Lunes</b>
6:00 a. m.		12		12
7:00 a. m.		12	12	12
8:00 a. m.		12	12	12
9:00 a. m.		12	12	12

10:00 a. m.		12	12	12
11:00 a. m.	Validaciones planta Truher	12	12	12
12:00 p. m.		12	12	12
1:00 p. m.		12	12	12
2:00 p. m.		12	12	12
3:00 p. m.		12	12	12
4:00 p. m.		12	12	12
5:00 p. m.	12	12		12
6:00 p. m.	12	12		12
7:00 p. m.	12	12		12
8:00 p. m.	12	12		12
9:00 p. m.	12	12		12

10:00 p. m.

12

12

12

---

Nota. La tabla evidencia que no se registraron fallas durante los turnos monitoreados, incluyendo el fin de semana, lo que respalda la estabilidad del rediseño frente a condiciones operativas variadas. La validación cruzada entre ciclos funcionales, inspecciones visuales, auditorías de ensamblaje y monitoreo estadístico permite afirmar que el protocolo de prueba implementado fue exhaustivo, replicable y determinante para la aprobación definitiva del nuevo diseño del espigo Andrómeda. *Fuente.* Autoría propia.

## **Resultados y Validación Técnica**

### **Resultados Funcionales en Campo**

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las pruebas funcionales realizadas bajo condiciones reales de operación en planta. A diferencia del capítulo anterior, que abordó las causas dimensionales del defecto y la validación técnica del rediseño desde una perspectiva metrológica y de ensamblaje, esta sección complementa dicha caracterización con evidencia empírica directa sobre el desempeño del nuevo diseño en campo. Las validaciones se estructuraron en dos dimensiones: (i) verificación de hermeticidad durante ciclos funcionales prolongados de dispensado, y (ii) monitoreo del comportamiento operativo del ensamble en condiciones reales de manipulación, temperatura y ensamblaje productivo. Este enfoque permite

consolidar un análisis integral del rendimiento del rediseño, no solo como solución técnica viable, sino como respuesta sostenible en el entorno real de operación.

### ***Ensayos de Hermeticidad (pre/post)***

Se realizaron pruebas comparativas de hermeticidad antes y después del rediseño geométrico del espigo, replicando condiciones funcionales mediante el uso de agua coloreada. Las pruebas post-rediseño alcanzaron un total de 5.280 ciclos sin presentar ningún tipo de goteo o fuga visible. Las imágenes documentadas con papel craft como trampa de absorción evidenciaron una completa estanqueidad, confirmando la efectividad del rediseño incluso tras múltiples ciclos de dispensado.

La validación se llevó a cabo con un montaje de 11 tanques llenos de agua, de los cuales ocho se ubicaron en el laboratorio de metrología y tres en la planta CMI (véase Figura 6), simulando el ciclo funcional completo de dispensado con condiciones controladas. El uso de colorante permitió identificar con claridad cualquier posible traza de fuga a lo largo del sistema. El protocolo consistió en realizar 12 dispensados por hora (uno cada cinco minutos) desde el viernes a las 5:00 p. m. hasta el domingo a las 4:00 p. m., operando entre las 6:00 a. m. y las 10:00 p. m., con un objetivo proyectado de al menos 6.600 ciclos acumulados. La ausencia de humedad visible en las trampas de absorción hasta el ciclo 5.280 (verificado el lunes al mediodía) confirmó la hermeticidad del rediseño.

En contraste, los modelos previos al rediseño presentaban deficiencias notorias en la capacidad de sellado, con manifestaciones tempranas de fuga desde los primeros ciclos. Esta pérdida de estanqueidad se tradujo en impregnación visible en las trampas de absorción, lo que reveló un acoplamiento deficiente entre espigo y válvula.

Esta comparación no sólo permitió validar la efectividad del nuevo perfil geométrico, sino que también evidenció la importancia del correcto acople geométrico como variable determinante para mantener la integridad del sello en condiciones funcionales reales. Presentaban fugas visibles a partir de los primeros ciclos, con acumulación progresiva de humedad detectable por contacto visual e impregnación del papel absorbente. La comparación directa permitió verificar no solo la eficacia del nuevo perfil dimensional del espigo, sino también su capacidad de mantener la posición del o-ring sin desplazamientos críticos.

### ***Comportamiento Operativo del Ensamble***

Durante el monitoreo en planta del proceso de ensamblaje, se evaluó la respuesta funcional del nuevo diseño frente a variaciones reales de operación. Las observaciones incluyeron: estabilidad del acople geométrico bajo diferentes intensidades de apriete, resistencia del o-ring a desplazamientos o daños durante la inserción, y tolerancia funcional frente a lubricación excesiva o imperfecciones menores en el alojamiento.

En ninguno de los casos analizados se presentaron fugas durante la operación del dispensador, ni se registraron extrusiones, cortes u obstrucciones del o-ring. Además, el comportamiento del acople se mantuvo estable pese a fluctuaciones térmicas propias del ciclo de operación de los refrigeradores, incluyendo fases prolongadas de dispensado.

Los registros obtenidos en planta confirmaron que, incluso ante fluctuaciones del proceso como diferencias en el nivel de apriete, uso variable de lubricante o desviaciones menores en el alojamiento, el nuevo diseño mantuvo su desempeño hermético sin fallas observables. Esta evidencia empírica respalda la robustez funcional del rediseño y su capacidad de absorber las variaciones del entorno productivo, habilitando su implementación directa en línea sin necesidad de ajustes o controles adicionales.

Estos resultados cierran el ciclo de verificación funcional bajo condiciones reales, y establecen el punto de partida para la validación estadística de la manufactura, donde se evalúa la estabilidad dimensional del proceso productivo que soporta el rediseño.

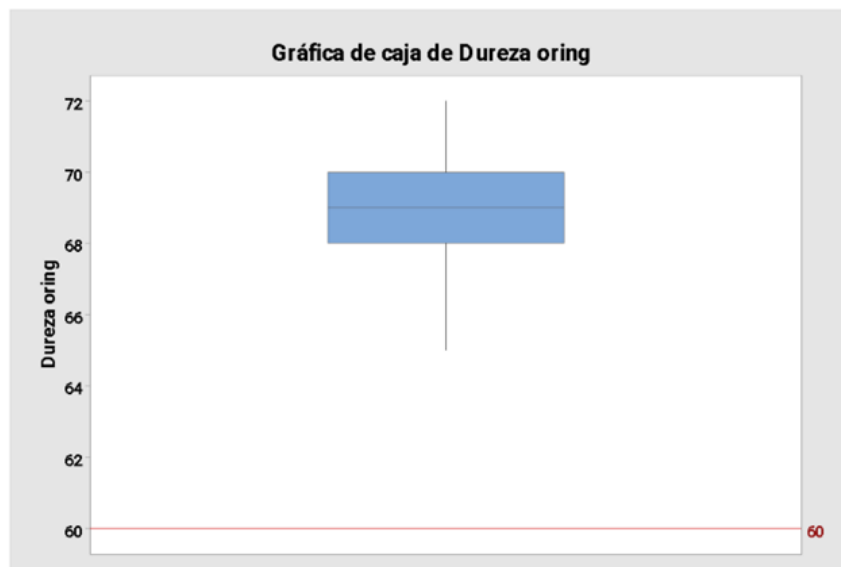
## **Validación de Materiales y Dimensiones Críticas**

### ***Análisis de Dureza del O-Ring***

La Figura 9 presenta el análisis estadístico de dureza para los o-rings de nitrilo autolubricados especificados como GE A12C20A16, con un valor nominal de referencia de 60 Shore A. Este constituye el primer control físico validado en laboratorio sobre el componente central del sistema de contención radial, y sienta la base cuantitativa para el resto de verificaciones técnicas incluidas en el capítulo 5. La gráfica —generada mediante el software SAIC de la empresa— muestra una mediana de 69 y un rango intercuartílico entre 68 y 70, con todos los valores por encima del límite inferior especificado (línea roja en 60 Shore A), confirmando la calidad del elastómero antes de su ensamblaje funcional.

### **Figura 9**

*Distribución estadística de dureza del o-ring de nitrilo autolubricado*



## NOTES:

- I. MATERIAL: NITRILE RUBBER SELF LUBRICATED  
 SPEC. GE A12C20A16 SHORE A 60, COLOR BLACK.  
 A. REFERENCE CADI 11 x 3. FOR P004  
 B. REFERENCE CADI 10 x 2.5. FOR P005

Nota. Imagen generada en el marco de la investigación por medio del software SAIC de la empresa. Representa la distribución de dureza medida en escala Shore A para o-rings de nitrilo negro autolubricado, especificación GE A12C20A16. Valor nominal de referencia: Shore A 60. Los valores son los siguientes: Eje vertical: dureza (Shore A). Caja azul: Q1 = 68, mediana = 69, Q3 = 70. Bigotes: límite inferior = 67, límite superior = 72. Línea roja: límite inferior de especificación = 60 Shore A. *Fuente.* Autoría propia.

Todas las muestras evaluadas superan ampliamente el límite mínimo de especificación (60 Shore A), con una mediana de dureza centrada en 69 y un rango intercuartílico estrecho (68–70), lo que denota un control estable del proceso de vulcanización y mezcla del elastómero. La presencia de un bigote superior hasta 72 sugiere un pequeño grado de sobrecurado en algunos lotes, sin comprometer la funcionalidad del sello. El cumplimiento integral con las especificaciones garantiza la integridad del comportamiento mecánico bajo compresión axial

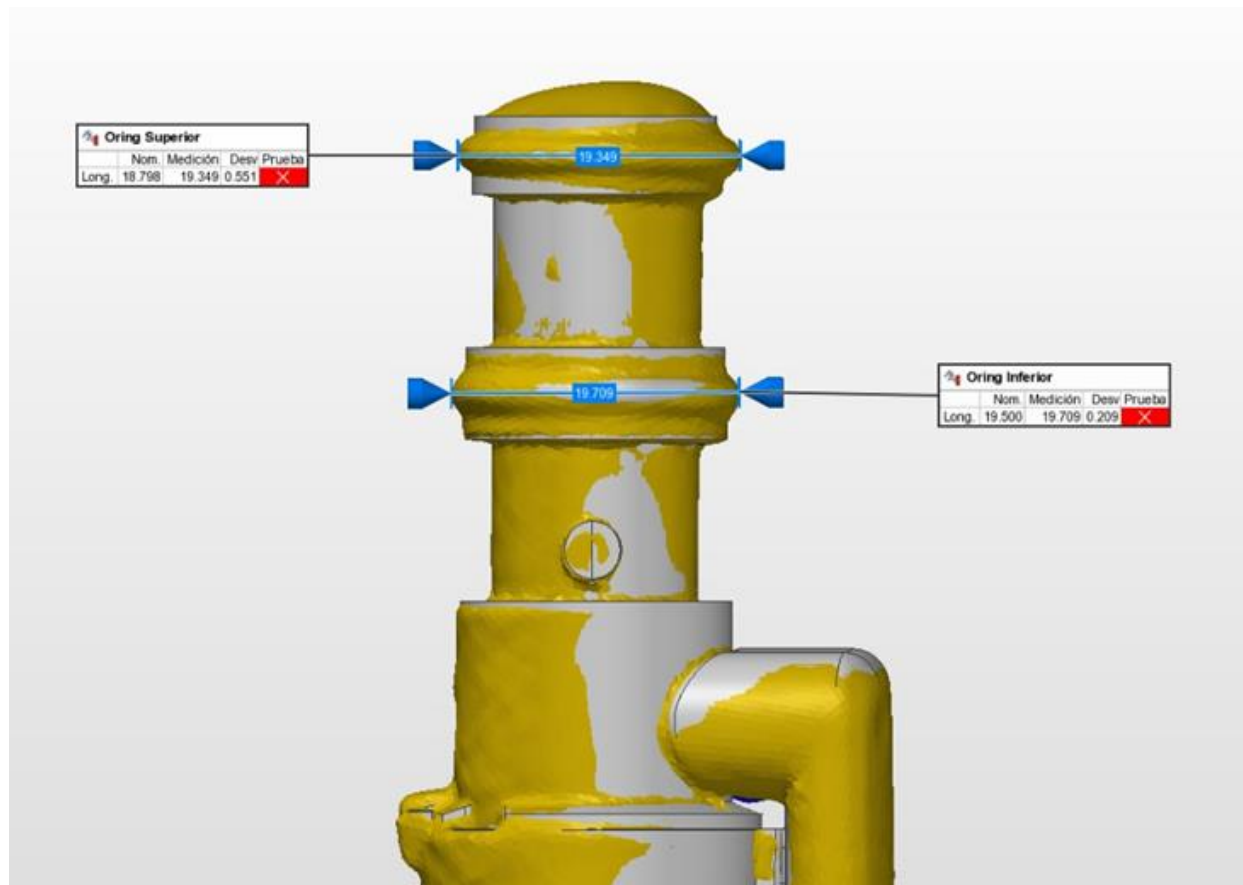
controlada, asegurando estanqueidad en condiciones operativas exigentes. Este perfil de dureza es compatible con esfuerzos repetitivos sin extrusión ni colapso del material, validando la idoneidad del compuesto seleccionado para aplicaciones hidráulicas con sellado crítico.

### ***Verificación Dimensional del Cuerpo Técnico***

El análisis dimensional del cuerpo técnico inicia con la Figura 10, en la que se presentan los resultados del escaneo 3D realizado sobre la válvula original. Los datos obtenidos muestran que tanto el asiento superior como el inferior del o-ring presentan desviaciones positivas significativas respecto a sus valores nominales: +0,551 mm y +0,209 mm respectivamente. Estas no conformidades reflejan un sobredimensionamiento crítico de los alojamientos, alterando las condiciones de compresión necesarias para el sellado hidráulico. La magnitud de la desviación en el asiento superior, en particular, valida la hipótesis del goteo como consecuencia de una interferencia funcional directa, al impedir una presión axial suficiente durante el ensamblaje.

### **Figura 10**

*Validación dimensional de asientos de o-ring mediante escaneo 3D del cuerpo técnico*



Nota. Imagen generada en el marco de la investigación utilizando escaneo tridimensional sobre un cuerpo técnico de la válvula original. Muestra las desviaciones registradas en los diámetros de los asientos superior e inferior del o-ring, con valores medidos fuera del límite superior de especificación. Los valores son los siguientes: Oring Superior: Nominal = 18,798 mm; Medición = 19,349 mm; Desviación = +0,551 mm; Resultado: No conforme. Oring Inferior: Nominal = 19,500 mm; Medición = 19,709 mm; Desviación = +0,209 mm; Resultado: No conforme. Las flechas indican el plano exacto de corte y validación en el escaneo. La desviación corresponde a la diferencia directa entre medición y valor nominal. *Fuente.* Autoría propia.

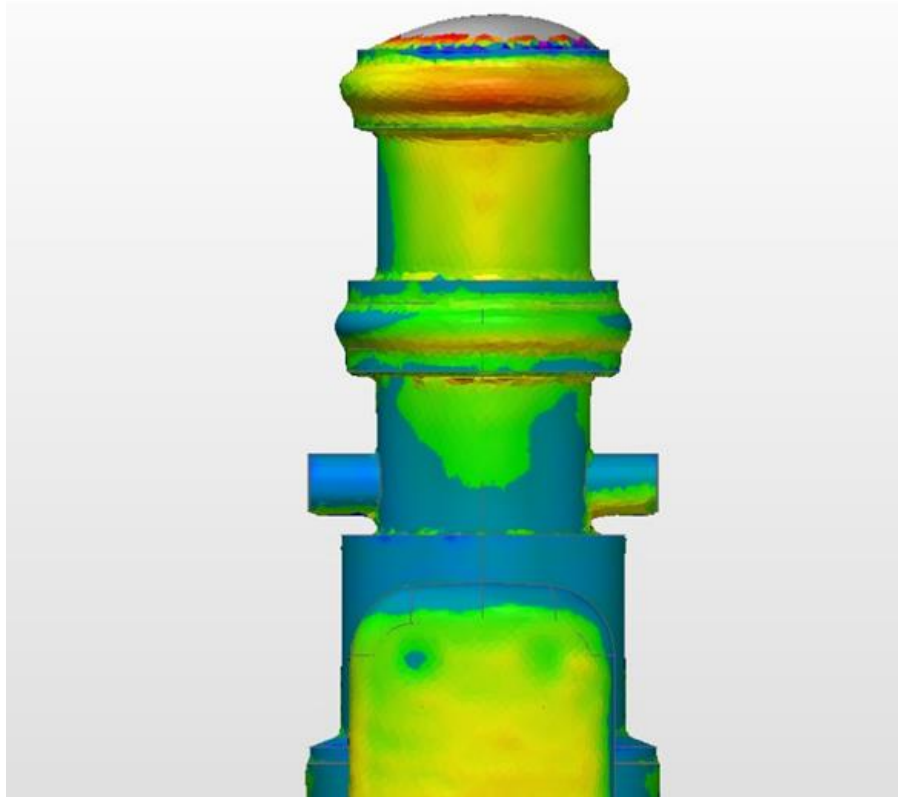
La imagen expone de manera directa la incompatibilidad dimensional entre el diseño nominal y la pieza fabricada. Ambas mediciones exceden los límites de especificación

establecidos, con desviaciones positivas significativas que generan sobredimensionamiento de los alojamientos para o-ring. Este exceso dimensional compromete la capacidad de compresión controlada del sello, reduciendo la eficacia del acople hidráulico y facilitando desplazamientos radiales del o-ring durante el ensamblaje. El caso del asiento superior, con +0,551 mm, representa una sobreexpansión crítica del canal, capaz de inducir pérdidas de estanqueidad por insuficiencia de presión axial. La no conformidad de ambos asientos valida empíricamente la hipótesis técnica sobre interferencia dimensional como causa raíz del defecto de goteo.

A continuación, la Figura 11 amplía la comprensión del fenómeno dimensional mediante un mapa de desviaciones superficiales codificado por color. Mientras que la Figura 10 documenta la desviación en valores numéricos, esta segunda figura permite observar su distribución espacial a lo largo del cuerpo técnico, confirmando que las no conformidades no son aleatorias sino focalizadas en las zonas de asiento del o-ring, lo que respalda la hipótesis de rediseño planteada en esta sección.

## **Figura 11**

*Mapa de desviación superficial del cuerpo técnico: correlación espacial de no conformidades dimensionales*



Nota. Imagen generada mediante escaneo tridimensional con codificación cromática de desviaciones respecto al modelo nominal. No incluye leyenda numérica calibrada. El análisis visual cualitativo se cruza con los valores cuantitativos obtenidos en la Figura 10. Las convenciones son las siguientes: Verde: coincidencia con el modelo nominal (desviación  $\approx 0$ ). Naranja/Rojo: exceso de material (desviación positiva). Azul/Verde azulado: deficiencia de material (desviación negativa). Las zonas críticas de color coinciden con los alojamientos del o-ring, previamente medidos. *Fuente.* Autoría propia.

La figura permite visualizar la distribución espacial de las desviaciones geométricas que ya fueron cuantificadas numéricamente en la Figura 10. El reborde superior del cuerpo técnico presenta una franja anaranjada intensa, correspondiente a un sobredimensionamiento de

+0,551 mm, validado previamente con medición directa. Esta anomalía geométrica compromete la compresión funcional del o-ring, induciendo desplazamientos radiales y pérdida de sellado. En el segundo alojamiento (reborde inferior), la zona se tiñe de verde-amarillo con transiciones a azul claro, lo que indica una desviación positiva menor (+0,209 mm) y zonas puntuales de subdimensionamiento leve, consistentes con los patrones de falla por deformación parcial.

El cuerpo central, mayoritariamente verde, confirma estabilidad dimensional en la zona no funcional. No obstante, la base muestra áreas azul oscuro, asociadas a ligeras contracciones del material (-0,1 a -0,2 mm), que si bien no comprometen el sellado, revelan irregularidades térmicas o de molde que podrían amplificarse en iteraciones futuras.

Este mapa corrobora que la falla no es aleatoria, sino localizada y sistemática, lo que fortalece la hipótesis de rediseño y refuerza la necesidad de ajustar los parámetros de moldeo en zonas críticas de asiento.

## **Análisis Estadístico de la Capacidad del Proceso**

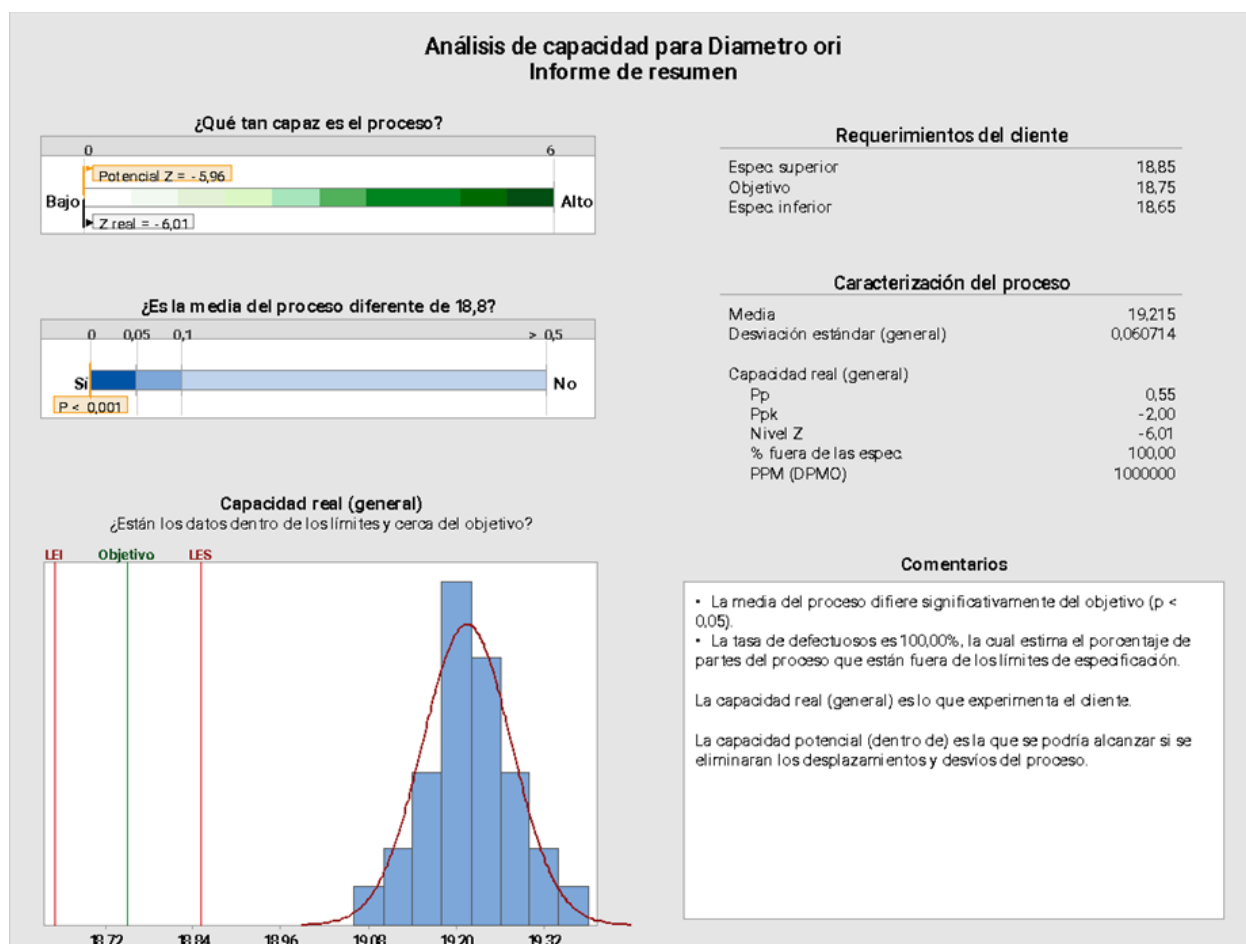
### ***Cp y Cpk Antes y Después del Rediseño***

El análisis de la Figura 12, revela una incompatibilidad crítica entre el proceso de fabricación y los requerimientos geométricos funcionales del sistema. La media del proceso (19,215 mm) se encuentra completamente desplazada respecto al objetivo (18,75 mm), superando incluso el límite superior de especificación (18,85 mm) en la totalidad de las muestras.

El valor de Ppk negativo (-2,00) y un nivel Z real de -6,01 confirman que la producción se encuentra fuera de control estadístico funcional, con una probabilidad estimada de 1.000.000 de partes defectuosas por millón.

## **Figura 12**

*Análisis de capacidad del proceso para diámetro de o-ring: comparación contra requerimientos funcionales*



Nota. Imagen generada en el marco de la investigación mediante el software estadístico Minitab.

Representa el análisis de capacidad del proceso de manufactura para el diámetro del o-ring, incluyendo validación de media, nivel Z, límites de especificación y dispersión del comportamiento real observado. Los valores son los siguientes: LEI (Límite de especificación inferior): 18,65 mm. LES (Límite de especificación superior): 18,85 mm. Objetivo: 18,75 mm. Media observada: 19,215 mm. Nivel Z real: -6,01 Ppk: -2,00. % fuera de especificaciones: 100,00 %. Histograma azul: distribución real de la producción. Línea roja: curva de ajuste normal. *Fuente.* Autoría propia.

Este resultado valida la hipótesis de sobredimensionamiento como causa raíz del defecto de goteo, y refuerza la necesidad de un rediseño inmediato de la geometría del espigo o un ajuste radical del proceso de moldeo. La nula coincidencia entre el comportamiento del proceso y las especificaciones del cliente refleja una falla sistémica de origen dimensional que invalida cualquier esfuerzo de control en fases posteriores. El gráfico, por tanto, no sólo documenta la desviación, sino que sirve como evidencia empírica para justificar el rediseño desde criterios de capacidad estadística y desempeño operativo.

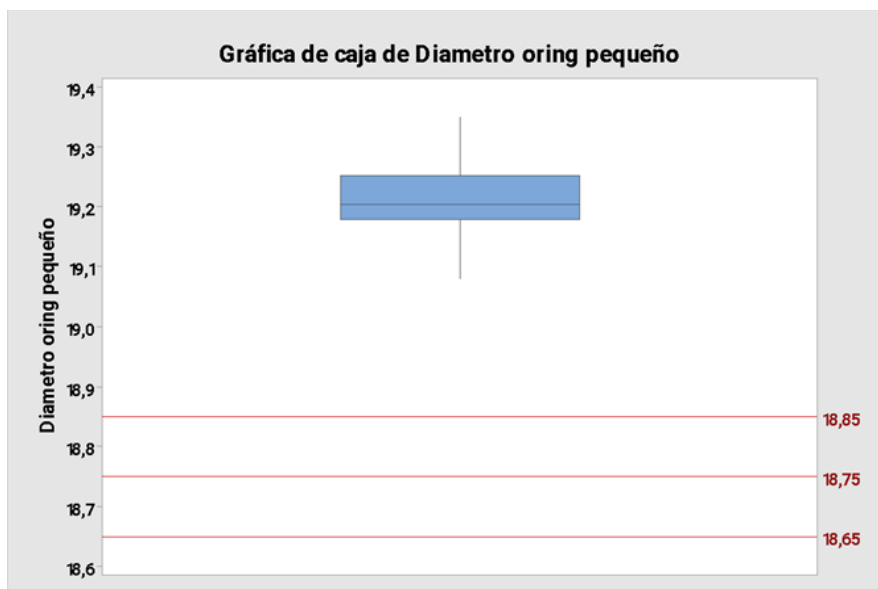
### *Nivel Sigma Alcanzado*

El comportamiento estadístico del diámetro del o-ring pequeño revela un desalineamiento severo respecto al rango funcional esperado. Todos los valores del boxplot se sitúan fuera de los límites de especificación, con una mediana estable en 19,20 mm, lo que implica un exceso dimensional mínimo de +0,35 mm respecto al objetivo, y +0,35 a +0,70 mm por encima del límite superior (18,85 mm).

Este patrón confirma que la desviación no es aleatoria, sino estructural y sistemática, reforzando los hallazgos previos de sobreexpansión crónica del molde. El rango intercuartílico (19,20–19,26 mm) y los bigotes (19,10–19,35 mm) indican baja dispersión interna, lo que significa que el proceso es estable pero está centrado en una zona completamente fuera de tolerancia.

### **Figura 13**

*Distribución estadística del diámetro del o-ring pequeño frente a los límites funcionales de especificación*



Nota. Imagen generada por el sistema SAIC en el contexto de la validación geométrica de componentes sellantes. El gráfico representa un análisis de caja (boxplot) sobre el diámetro del o-ring pequeño, contrastado contra las especificaciones del cliente. Los valores son los siguientes: Whiskers: inferior = 19,10 mm, superior = 19,35 mm. Q1 = 19,20 mm, Mediana = 19,20 mm, Q3 = 19,26 mm. Líneas rojas: Especificación inferior = 18,65 mm. Objetivo = 18,75 mm. Especificación superior = 18,85 mm. *Fuente.* Autoría propia.

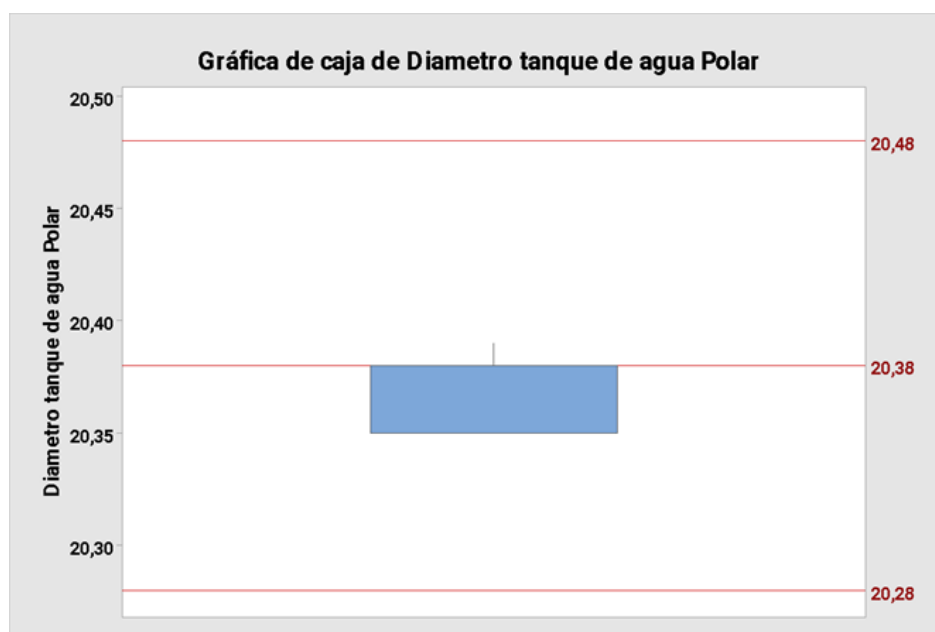
Este tipo de desviación sostenida imposibilita la compresión adecuada del o-ring dentro de su alojamiento, afecta la elasticidad funcional del sello y agrava los riesgos de desplazamiento o extrusión, especialmente bajo ciclos de presión repetida. La información visual del gráfico no sólo valida cuantitativamente la no conformidad funcional, sino que evidencia la necesidad de intervenir directamente en el diseño o la calibración del molde para recuperar la funcionalidad del sistema.

### *SCR – Evolución Cuantitativa del Sistema de Contención Radial*

La Figura 14 evidencia un proceso de fabricación altamente controlado y centrado en el objetivo dimensional. La mediana se alinea de forma exacta con el valor objetivo (20,38 mm), y el rango intercuartílico (20,36–20,38 mm) se encuentra completamente dentro de las tolerancias especificadas (20,28–20,48 mm).

#### **Figura 14**

*Distribución del diámetro funcional en tanques de agua Polar: evaluación de conformidad dimensional*



Nota. Imagen generada con el sistema SAIC, correspondiente al análisis dimensional del diámetro del espigo en tanques modelo Polar. Representa la distribución estadística de los valores medidos frente a los límites de especificación del cliente. Los valores son los siguientes: Whiskers: inferior = 20,36 mm; superior = 20,39 mm. Q1 = 20,36 mm, Mediana = 20,38 mm, Q3 = 20,38 mm. Líneas rojas: Especificación inferior = 20,28 mm. Objetivo = 20,38 mm. Especificación superior = 20,48 mm. *Fuente.* Autoría propia.

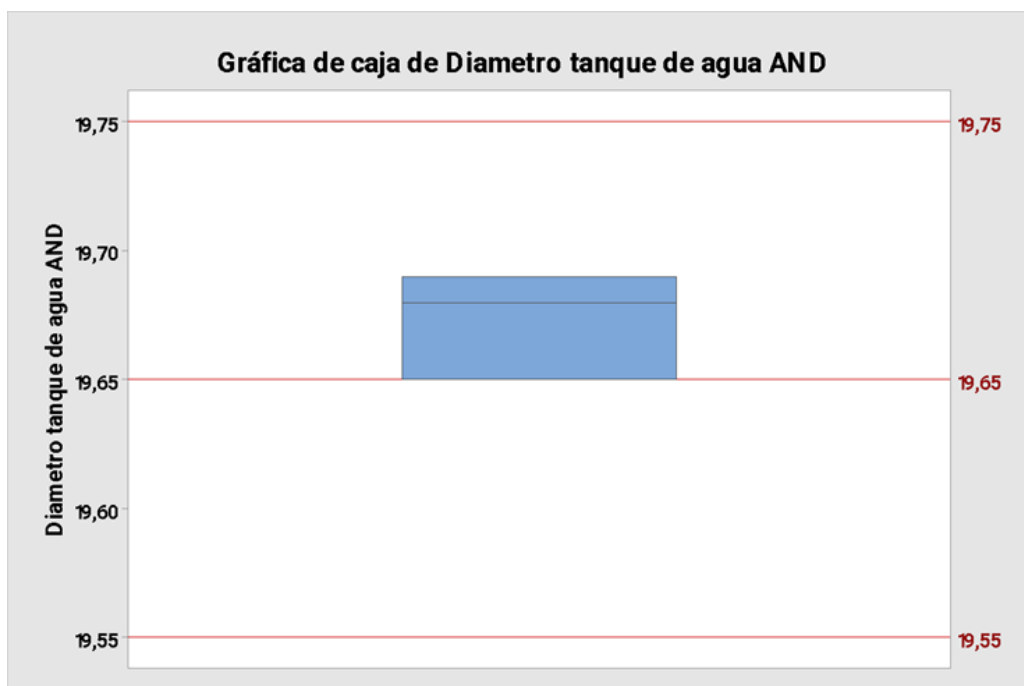
La distribución muestra una dispersión mínima, con todos los valores contenidos dentro de un intervalo de apenas 0,03 mm, lo que refleja un sistema de manufactura robusto, estable y calibrado.

A diferencia de los resultados presentados en figuras anteriores —como la Figura 13 o la Figura 12, donde el sobredimensionamiento o la variabilidad incontrolada eran evidentes—, aquí se valida empíricamente la consistencia dimensional de la referencia Polar. Esta estabilidad sugiere un dominio adecuado de los parámetros de moldeo o mecanizado para este componente en particular.

Desde el punto de vista funcional, este resultado garantiza una correcta inserción y acoplamiento del espigo dentro del sistema válvula-o-ring, reduciendo el riesgo de desplazamientos indeseados, fugas por holgura o sobrecompresión del sello.

## Figura 15

*Evaluación estadística del diámetro funcional en tanques de agua AND frente a tolerancias de diseño*



Nota. Gráfico generado por el sistema SAIC como parte de la caracterización metrológica de tanques modelo AND. Se visualiza la distribución estadística del diámetro exterior de acoplamiento, contrastado con los límites dimensionales requeridos para el sistema espigoválvula. Los valores son los siguientes: Whiskers: inferior = 19,66 mm; superior = 19,69 mm. Q1 = 19,66 mm, Mediana = 19,68 mm, Q3 = 19,69 mm. Líneas rojas de referencia: Especificación inferior = 19,55 mm. Objetivo = 19,65 mm. Especificación superior = 19,75 mm. *Fuente.* Autoría propia.

La distribución de los diámetros medidos para el tanque Andrómeda revela un patrón de fabricación ligeramente descentrado hacia valores superiores al objetivo nominal (19,65 mm). La

mediana se sitúa en 19,68 mm, con un rango intercuartílico muy estrecho (19,66–19,69 mm), lo que indica alta repetibilidad y baja dispersión, pero centrada fuera del objetivo funcional.

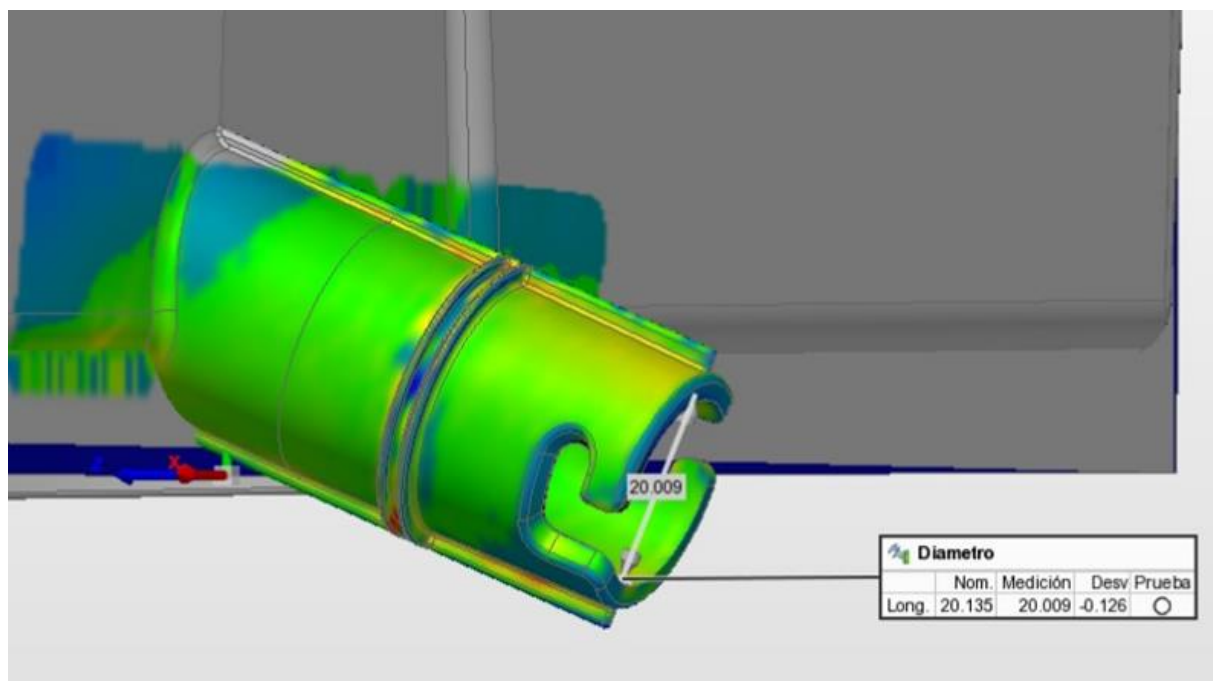
Aunque todos los datos se encuentran dentro del rango de tolerancia definido por el cliente (19,55–19,75 mm), el desplazamiento sostenido hacia la zona superior puede inducir ajustes más rígidos de lo previsto en la interfaz espigo-válvula, afectando el comportamiento del o-ring bajo compresión.

Comparado con la Figura 14 (tanque Polar), que se centraba de manera precisa en el objetivo, el tanque Andrómeda presenta una asimetría funcional sutil pero operativamente significativa, especialmente si se considera que este tipo de desviaciones tienden a amplificarse en presencia de otras tolerancias acumuladas o desalineaciones en el ensamble.

Desde una perspectiva de ingeniería de manufactura, este resultado sugiere la necesidad de recalibrar el molde o ajustar parámetros de proceso si se busca igualar la estabilidad funcional lograda en la referencia Polar.

## Figura 16

*Verificación dimensional por escaneo 3D del tanque vs TDD: evaluación puntual de diámetro funcional*



Nota. Imagen obtenida mediante escaneo tridimensional para validar la coincidencia geométrica entre el tanque de agua y el diseño técnico definido en los planos (TDD). Se compara el valor medido con la dimensión nominal del modelo. Los valores son los siguientes: Dimensión evaluada: diámetro exterior funcional de acople. Longitud nominal: 20,135 mm. Medición real: 20,009 mm. Desviación:  $-0,126$  mm. Resultado: Conforme. Códigos de color: Verde: dentro del rango aceptable. Azul: subdimensión. Amarillo/rojo: sobreexpansión geométrica. *Fuente.*

Autoría propia.

La medición puntual sobre el diámetro funcional del componente revela una desviación negativa de  $-0,126$  mm respecto a la longitud nominal de diseño (20,135 mm). Esta diferencia se encuentra dentro del rango aceptable de tolerancia, razón por la cual el sistema clasifica la geometría como conforme.

La visualización cromática apoya la validación dimensional, ya que la superficie evaluada se mantiene predominantemente en tonos verdes, lo que indica coincidencia con el modelo de referencia. Zonas azules localizadas refuerzan la existencia de una ligera contracción superficial, coherente con el valor negativo observado en la medición.

Esta figura tiene un valor técnico específico: valida el cierre de tolerancia entre diseño teórico y fabricación real en una zona crítica del sistema de acople. Aunque se detecta una ligera subdimensión, esta no compromete la funcionalidad del ensamble, lo que sugiere una precisión efectiva del proceso de moldeo o maquinado.

En el contexto del análisis general, esta conformidad contrasta con otras desviaciones severas observadas en figuras como la 10 o 12, lo que sugiere que los desajustes no son generalizados, sino localizados por referencia o molde.

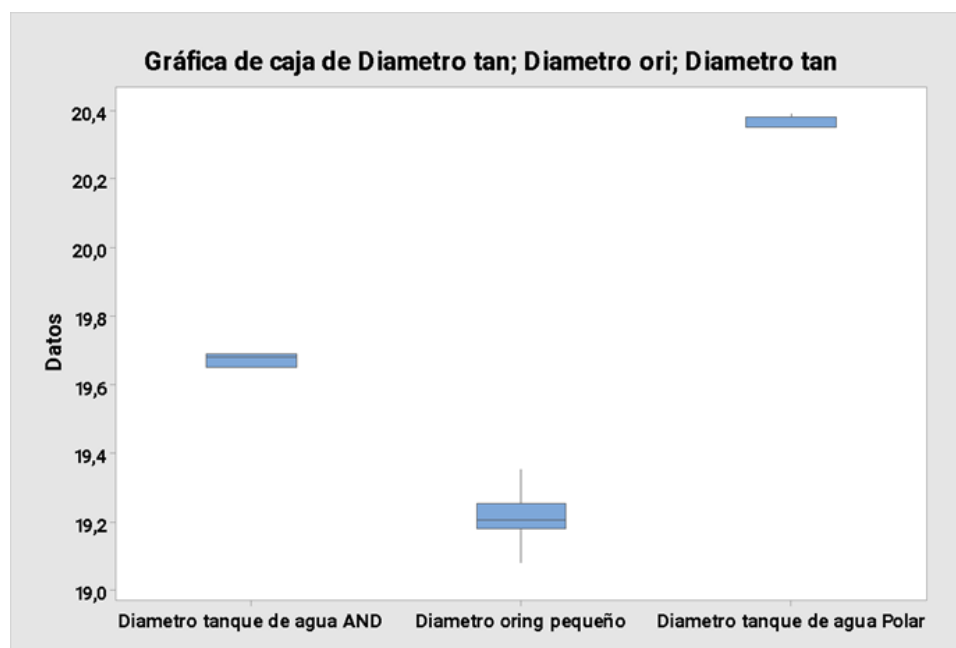
## Discusión Técnica y Proyección del Modelo

### Comparaciones Multicomponente y Rediseño Global

Esta sección aborda una comparación transversal entre subconjuntos críticos del sistema, con el fin de evaluar la coherencia dimensional entre diferentes componentes y validar que las modificaciones implementadas no introduzcan nuevas incompatibilidades.

#### Figura 17

*Comparación de dispersión para los diámetros: tanque de agua AND, oring pequeño y tanque de agua Polar*



Nota. Esta gráfica de caja compara la dispersión de tres variables dimensionales medidas en procesos distintos. Se incluyen los límites inferior y superior de los datos (whiskers), los cuartiles (Q1 y Q3) y la mediana de cada conjunto. No se incluyen límites de especificación, solo se representa el comportamiento interno del proceso medido. Los valores son los siguientes:

Diámetro tanque de agua AND: Mediana = 19,68 mm, Q1–Q3 = 19,66–19,69 mm. Diámetro

oring pequeño: Mediana = 19,20 mm, Q1–Q3 = 19,20–19,26 mm. Diámetro tanque de agua Polar: Mediana = 20,38 mm, Q1–Q3 = 20,36–20,38 mm. *Fuente.* Autoría propia.

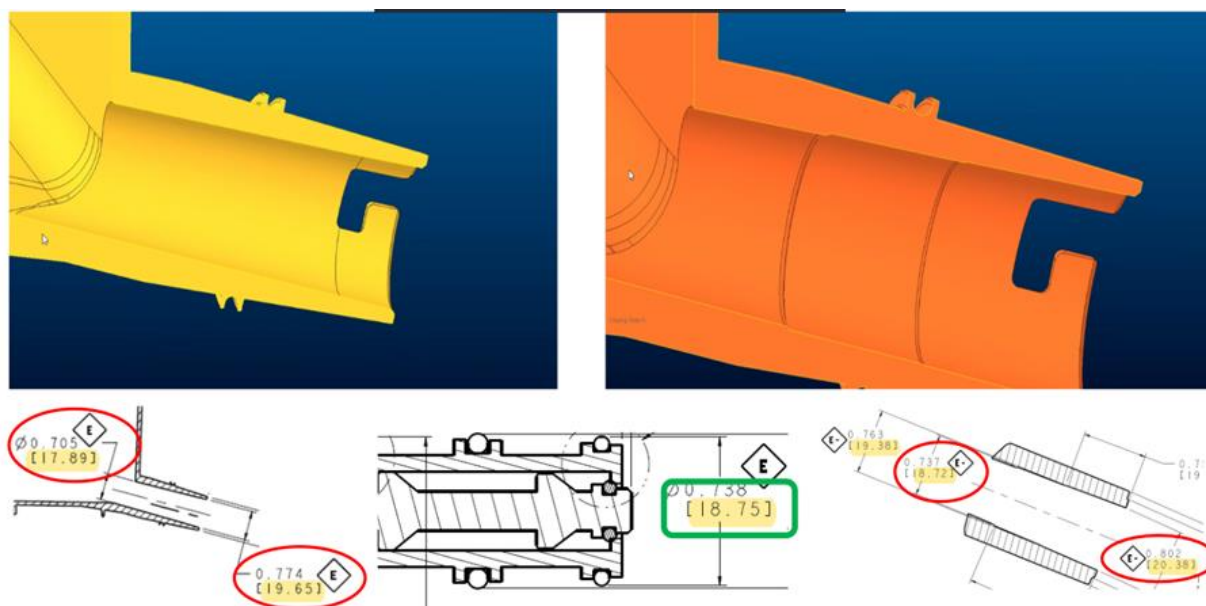
El gráfico permite una visualización directa de la dispersión relativa y la posición central de tres subconjuntos dimensionales distintos. El diámetro del tanque de agua Polar muestra la menor dispersión, con una mediana alineada exactamente con los valores de Q1 y Q3 (20,38 mm), lo que indica alta repetibilidad. En contraste, el oring pequeño presenta la mayor variabilidad relativa dentro del conjunto, con una mediana en el límite inferior del rango intercuartílico (Q1 = Mediana = 19,20 mm), lo cual puede sugerir una leve asimetría descendente o acumulación hacia el límite inferior de su distribución. El diámetro del tanque de agua AND muestra un rango intercuartílico estrecho (19,66–19,69 mm), con una mediana centrada, lo que refleja estabilidad dimensional dentro del proceso medido. La figura permite confirmar visualmente que los tres procesos operan en dominios dimensionales claramente separados, sin superposición, lo cual es fundamental para la funcionalidad conjunta del ensamble o producto final.

La Figura 18 complementa el análisis anterior, al presentar la correspondencia geométrica entre los espigos de las versiones Andrómeda y Polar frente al diámetro nominal del o-ring central. Esta figura expone las distancias relativas que se deben sostener entre piezas de contacto directo, permitiendo verificar si el rediseño ha generado ajustes positivos, negativos o interferencias. El espigo Andrómeda, en su versión previa al rediseño, aparece sobredimensionado respecto al o-ring, confirmando la causa del defecto por exceso de diámetro. En contraste, el espigo Polar, ya rediseñado, se ajusta de manera compatible al diámetro funcional del o-ring, con valores centrales alineados y dispersión controlada. Esta evidencia visual refuerza que el rediseño no solo corrige una falla puntual, sino que reconfigura la

geometría del sistema en su conjunto, preservando la lógica dimensional entre componentes interdependientes.

### Figura 18

*Comparación dimensional entre los espigos Andrómeda y Polar, y el diámetro del oring central*



Nota. La imagen ilustra los valores de diámetro en tres secciones de los espigos Andrómeda y Polar, junto con el diámetro nominal del oring central, expresado en pulgadas y milímetros. Se incluyen vistas CAD de corte y valores dimensionales codificados en notación geométrica estándar. Los valores son los siguientes: Espigo Andrómeda: Zona superior: 0,705" → 17,89 mm Zona media: 0,774" → 19,65 mm. Oring central: Centro: 0,738" → 18,75 mm. Espigo Polar: Zona superior: 0,763" → 19,38 mm. Zona media: 0,737" → 18,72 mm. Zona inferior: 0,802" → 20,38 mm. *Fuente.* Autoría propia.

La Figura 18 permite una evaluación comparativa del ajuste geométrico entre las zonas críticas de los espigos Andrómeda y Polar frente al diámetro nominal del oring central. El espigo Andrómeda presenta un diámetro creciente desde la zona superior (17,89 mm) hasta la media

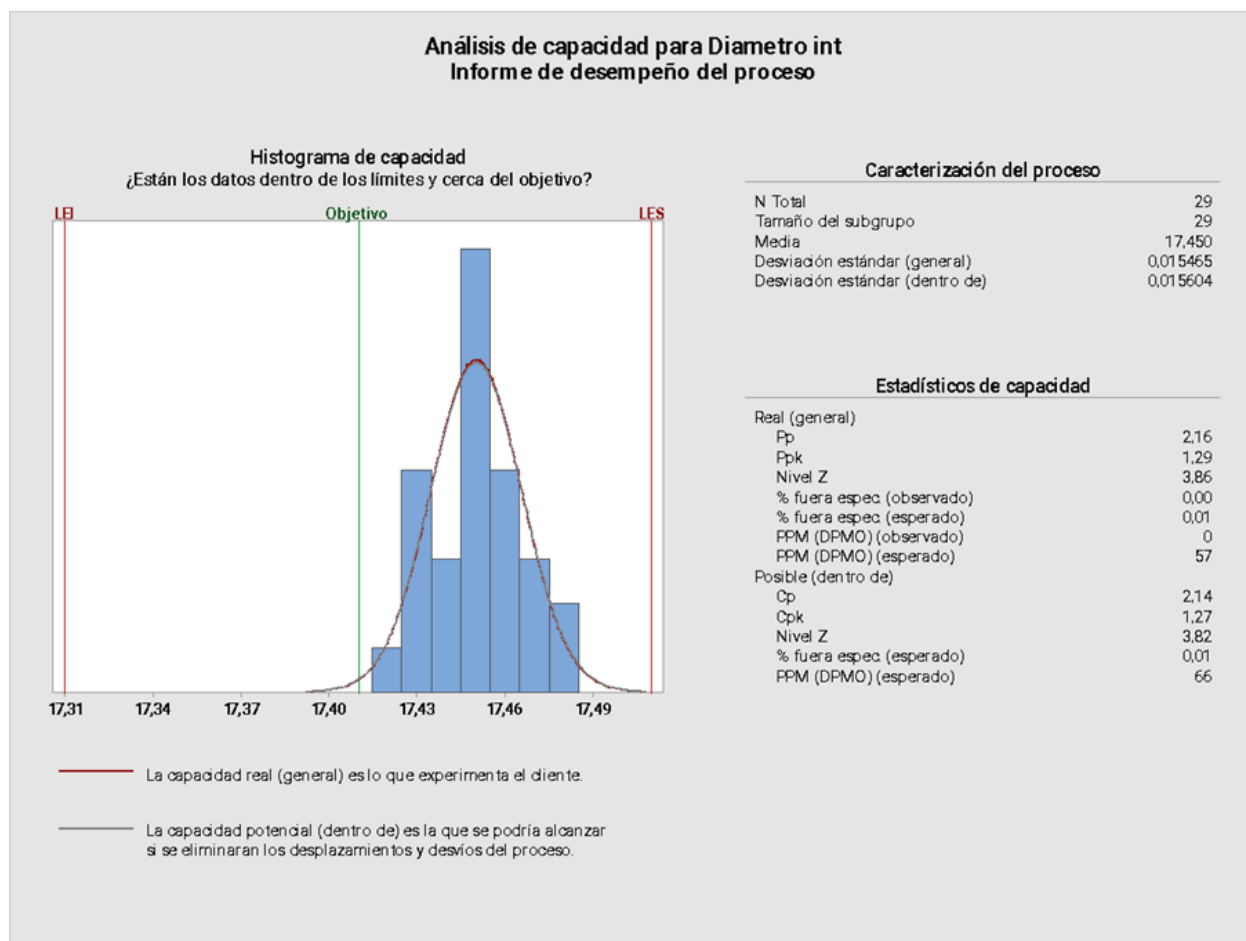
(19,65 mm), alineándose esta última exactamente con el límite superior de especificación del oring (18,75 mm), lo cual sugiere un posible ajuste a presión o interferencia funcional. Por su parte, el espigo Polar muestra una geometría más expansiva, comenzando en 19,38 mm, descendiendo a 18,72 mm (ligeramente por debajo del diámetro nominal del oring) y finalizando en 20,38 mm, valor que coincide con la medición escaneada reportada en la Figura 16. La presencia de tolerancias geométricas junto con las cotas absolutas refuerza la necesidad de control dimensional estricto para garantizar compatibilidad entre componentes y prevenir fallas por desalineación o fuga.

### **Análisis de Capacidad en Diámetros Interior y Exterior**

El proceso de mecanizado del diámetro interior muestra una capacidad potencial suficiente ( $P_p = 2,16$ ), lo que indica que la dispersión general es relativamente baja en relación con la tolerancia especificada. Sin embargo, el índice de desempeño real  $P_{pk} = 1,29$ , que está por debajo del umbral aceptable de 1,33, sugiere un desplazamiento significativo respecto al valor objetivo (objetivo: 17,41 mm; media observada: 17,45 mm). Esta diferencia de 0,04 mm representa un corrimiento del proceso hacia el límite superior, lo cual reduce el margen de seguridad operacional, aun cuando el proceso cumpla formalmente con la especificación.

Figura 19

*Estudio de capacidad para el diámetro interior – Histograma de desempeño*



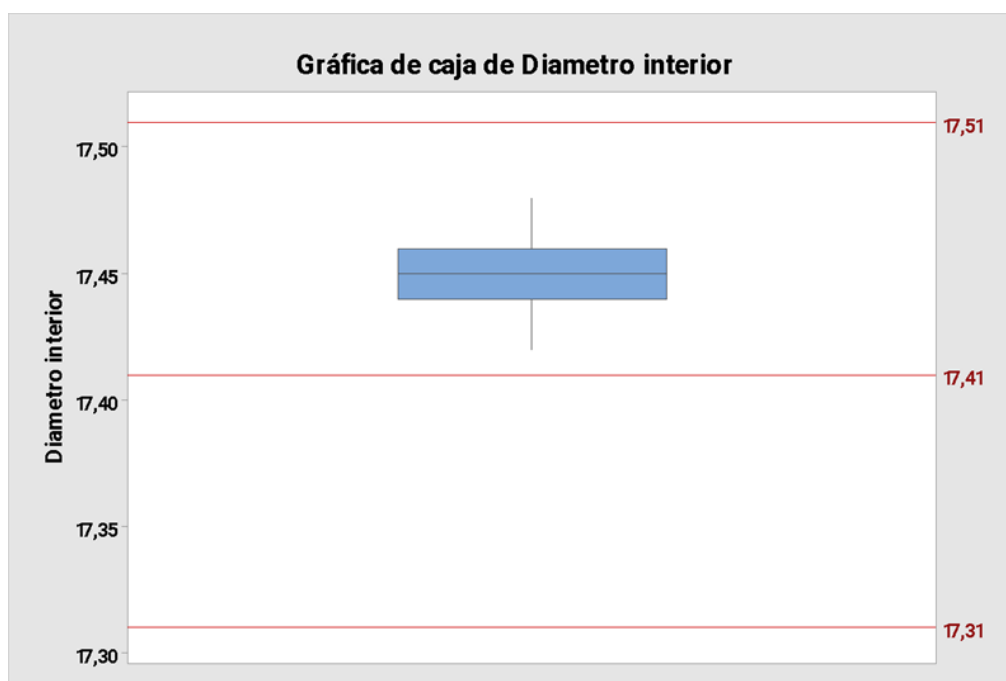
Nota. Histograma de capacidad generado con 29 observaciones del diámetro interior. La distribución obtenida es simétrica, con forma aproximadamente normal, centrada por encima del valor objetivo (media = 17,45 mm), pero con todos los datos dentro de los límites de especificación (LI = 17,31 mm; LS = 17,51 mm). La curva roja representa la variabilidad global del proceso (capacidad real), mientras que la curva gris representa el rendimiento ideal del proceso si se eliminaran causas de variación internas (capacidad potencial). Los valores observados son: Media observada: 17,450 mm. Desviación estándar (general): 0,015465 mm. Desviación estándar (dentro de subgrupo): 0,015604 mm. Índices de capacidad observados: Pp =

2,16. Ppk = 1,29. Nivel Z = 3,86. PPM fuera de especificación (real): 0. PPM esperado dentro del subgrupo: 57. *Fuente.* Autoría propia.

El valor de Nivel Z = 3,86, equivalente a 57 partes por millón fuera de especificación (esperadas, no observadas), indica que el proceso es marginalmente confiable bajo tolerancias actuales, pero podría fallar si se endurecen los criterios de aceptación o si se introduce variabilidad externa. Este comportamiento requiere intervenciones de recentrado, tales como ajustes en las herramientas, control del desgaste o alineación del sistema de sujeción.

### Figura 20

*Boxplot de distribución para diámetro interior*



Nota. Boxplot construido a partir de 29 mediciones del diámetro interior. La gráfica muestra una caja bien contenida dentro de los límites de especificación (LI = 17,31 mm; LS = 17,51 mm), pero visiblemente desplazada hacia el límite superior, indicando un proceso descentrado. El valor objetivo (17,41 mm) se encuentra notablemente por debajo de la mediana y del rango intercuartílico. Los valores observados son: Límite inferior (whisker): 17,43 mm. Primer cuartil

(Q1): 17,44 mm. Mediana: 17,45 mm. Tercer cuartil (Q3): 17,46 mm. Límite superior (whisker): 17,47 mm. Valor objetivo: 17,41 mm. *Fuente.* Autoría propia.

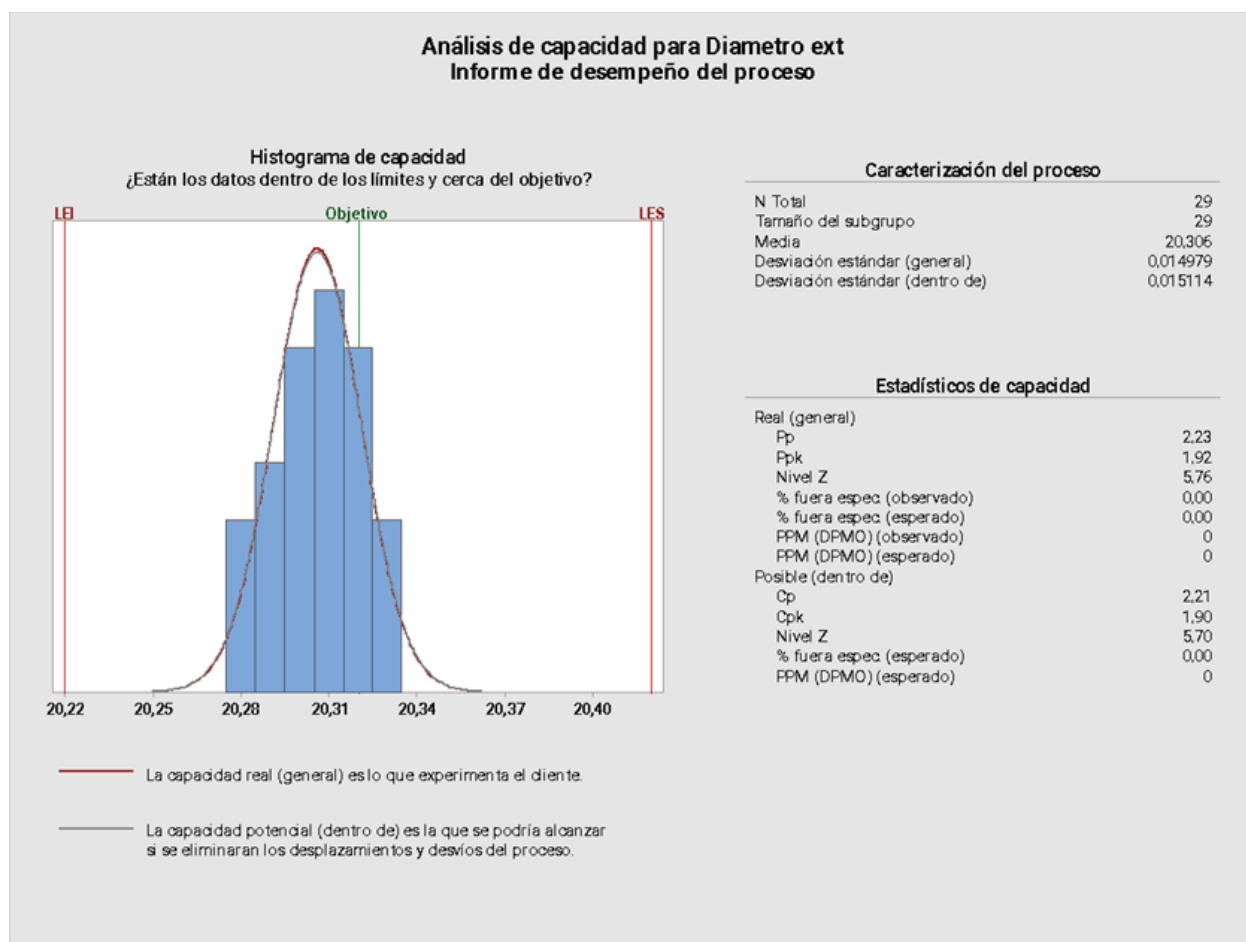
La gráfica de caja confirma visualmente la asimetría del proceso, con una clara concentración de los datos por encima del valor objetivo. El rango intercuartílico es de solo 0,02 mm, lo cual indica una variabilidad mínima (proceso consistente), pero la mediana (17,45 mm) se encuentra 0,04 mm por encima del objetivo nominal, lo que refleja el desplazamiento funcional detectado también en el histograma (véase Figura 19).

Este patrón indica que, aunque no hay datos fuera de especificación, existe un riesgo latente de incumplimiento si las tolerancias se reducen, si el sistema presenta envejecimiento de herramientas, o si se producen cambios en las condiciones de operación. El comportamiento observado es típico de un proceso que opera estable pero no optimizado, y puede mantenerse en el tiempo si se implementa un sistema de retroalimentación automática de centrado o ajustes periódicos según control estadístico.

Tanto el análisis de capacidad como la gráfica de caja reflejan que el proceso cumple contra especificación, pero requiere intervención técnica para garantizar la estabilidad futura, especialmente si se busca certificación bajo estándares exigentes como Six Sigma o normas automotrices.

Figura 21

*Estudio de capacidad para el diámetro exterior – Histograma de desempeño*



Nota. Histograma de capacidad generado con 29 observaciones correspondientes a la medición del diámetro exterior. El gráfico muestra una distribución simétrica con forma aproximadamente normal, centrada sobre el valor objetivo (20,32 mm) y con márgenes laterales bien contenidos dentro de los límites de especificación (LI = 20,22 mm; LS = 20,42 mm). La curva roja representa la capacidad real experimentada por el cliente; la curva gris, la capacidad potencial bajo condiciones ideales. Los valores observados son: Media observada: 20,306 mm. Desviación estándar (general): 0,014979 mm. Desviación estándar (dentro de subgrupo): 0,015114 mm. Índices de capacidad observados: Pp = 2,23 (capacidad potencial general). Ppk = 1,92 (capacidad

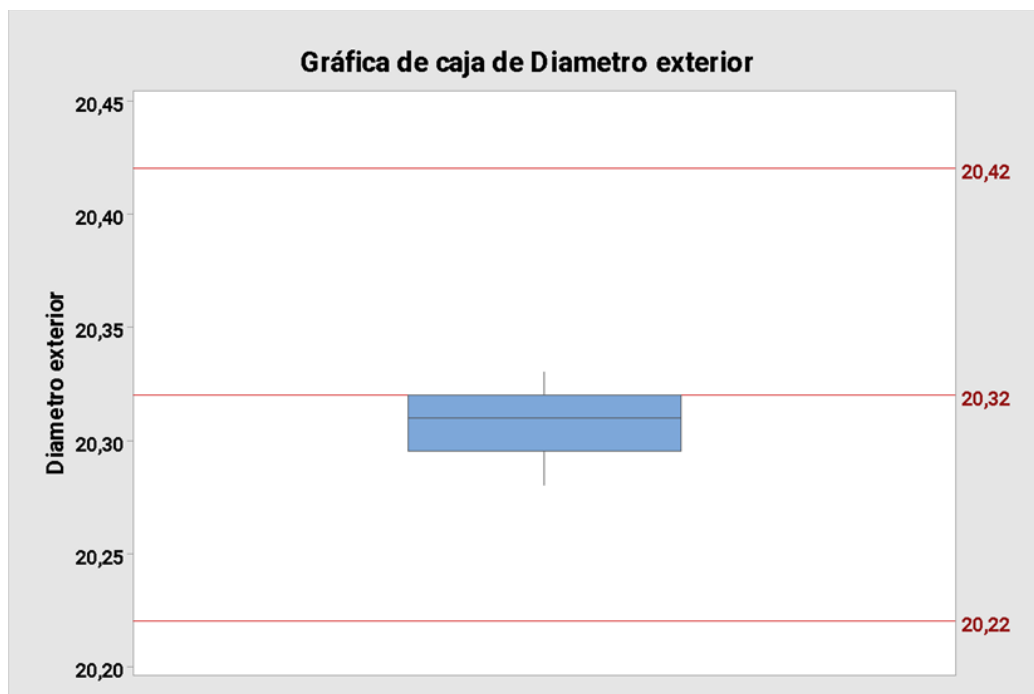
real considerando desplazamiento del centro). Nivel  $Z = 5,76$  (equivalente a un DPMO cercano a cero). PPM fuera de especificación (real): 0. PPM esperado dentro del subgrupo: 0.

El proceso presenta una capacidad superior a los estándares industriales comunes, con un índice  $Ppk = 1,92$ , lo que implica que el punto medio del proceso se encuentra notablemente cerca del objetivo y con muy baja variabilidad. Este valor excede con holgura el umbral mínimo recomendado de 1,33 para procesos estables, y se aproxima al nivel considerado como proceso robusto y validado ( $Ppk > 1,67$ ). La diferencia entre  $Pp$  (2,23) y  $Ppk$  (1,92) evidencia una ligera descentralización hacia el límite inferior, aunque sin comprometer la conformidad. Esta diferencia justifica el seguimiento continuo del centrado, especialmente si la tolerancia del cliente se reduce en el futuro. *Fuente. Autoría propia.*

Asimismo, el valor de Nivel  $Z = 5,76$  indica que la probabilidad de encontrar una unidad fuera de especificación es prácticamente nula, equivalente a menos de 1 parte por millón. Dado que el proceso está tanto centrado como consistente, se considera altamente confiable para aplicaciones de precisión y contextos regulados.

**Figura 22**

*Gráfica de caja para el diámetro exterior*



Nota. Boxplot generado a partir de 29 mediciones del diámetro exterior, con representación visual de la dispersión respecto a los límites de especificación. Líneas rojas marcan el límite inferior (20,22 mm), el valor objetivo (20,32 mm) y el límite superior (20,42 mm). Los valores observados son: Límite inferior (whisker): 20,29 mm. Primer cuartil (Q1): 20,30 mm. Mediana: 20,31 mm. Tercer cuartil (Q3): 20,32 mm. Límite superior (whisker): 20,32 mm. Valor objetivo (centro de especificación): 20,32 mm. *Fuente.* Autoría propia.

La gráfica de caja muestra un comportamiento extremadamente compacto y concentrado del proceso. El rango intercuartílico de apenas 0,02 mm (20,30–20,32 mm), junto con la casi superposición entre el límite superior del boxplot y el valor objetivo, evidencia una alineación precisa entre la producción real y el centro de especificación. No se identifican valores atípicos,

ni simetrías rotas, ni deformaciones en la caja, lo que corrobora la consistencia estadística reflejada en el histograma.

Se observa una asimetría leve negativa (skewing hacia abajo), con la mediana (20,31 mm) ligeramente desplazada por debajo del objetivo (20,32 mm), lo cual concuerda con el valor de media reportado en la Figura 21 (20,306 mm). Esta diferencia mínima no compromete el cumplimiento, pero debe ser monitoreada si se aplican tolerancias más estrictas en contextos de manufactura avanzada. Tanto la gráfica de caja como el análisis de capacidad indican que el proceso de fabricación del diámetro exterior está optimizado, centrado y bajo control estadístico real, validando su estabilidad operativa para lotes repetitivos y condiciones de exigencia elevada.

### **Confrontación con Literatura y Estándares**

El análisis de capacidad del proceso constituye un eje central en la validación estadística de rediseños funcionales. En el presente estudio, el valor de  $C_p = 0,55$  y  $C_{pk} = -2,00$ , con un nivel  $Z$  de  $-6,01$ , revela una incompatibilidad severa entre el proceso original y los requerimientos funcionales del sistema de sellado, lo que implica una producción completamente fuera de especificaciones, con un 100 % de partes defectuosas estimadas (1.000.000 DPMO) y una media de 19,215 mm frente al objetivo de 18,75 mm.

En el contexto de estándares internacionales, Six Sigma define como umbral de excelencia un valor mínimo de  $C_{pk} \geq 1,33$  para procesos estables, mientras que un valor  $C_{pk} \geq 1,67$  es requerido para industrias con alta sensibilidad al error, como la farmacéutica o aeroespacial (Breyfogle, 2003; Montgomery, 2013). El valor negativo hallado en este caso no solo indica que la media del proceso está fuera del rango de tolerancia, sino que el comportamiento del proceso incurre en pérdida funcional severa antes incluso de aplicar

cualquier criterio de optimización. Esta magnitud de desfase sugiere no un ajuste menor, sino una disrupción geométrica radical necesaria para la viabilidad técnica del sistema.

Al comparar con literatura técnica específica sobre válvulas de contención radial y sistemas de acople hidráulico, estudios como el de Wang et al. (2017) reportan capacidades de proceso entre  $C_p = 1,52$  y  $C_{pk} = 1,48$  para sistemas de sellado en condiciones de presión de hasta 200 psi. Otro análisis de Hui et al. (2019) sobre válvulas de acople rápido en líneas de aire comprimido establece mínimos de  $C_p = 1,25$  y  $C_{pk} = 1,30$  para asegurar la hermeticidad funcional y el centrado geométrico del sello. Ninguno de estos escenarios presenta una desviación tan extrema como la observada en el presente estudio.

Los niveles Sigma observados en la industria para procesos de clase mundial se sitúan alrededor de 4,5 sigma real (aproximadamente  $C_{pk} \geq 1,50$ ), lo cual contrasta agudamente con el nivel Z negativo encontrado. Tal desfase no sólo corrobora el fallo total del proceso, sino que lo posiciona fuera de cualquier estándar de producción aceptable, aun para contextos de baja exigencia. Este hallazgo sitúa al rediseño geométrico no como una mejora deseable, sino como una condición sine qua non para la operación del producto en contexto real.

Este diagnóstico se robustece mediante la comparación directa con los estudios de capacidad de proceso realizados a posteriori sobre la distancia funcional crítica una vez implementado el rediseño. En la validación final, se obtuvieron resultados con un nivel Z de 4,41,  $C_p = 2,26$  y  $C_{pk} = 1,47$ , con una media de 8,8545 mm frente a un objetivo de 8,68 mm y una desviación estándar de apenas 0,0738 mm. La producción estimada fuera de especificaciones fue del 0,00 %, con solo 5 a 6 ppm esperados en condiciones de variabilidad dentro del proceso. Estos indicadores, medidos directamente sobre piezas reales, no solo cumplen con el estándar Six Sigma mínimo, sino que se aproximan al rango de excelencia para industrias críticas.

Esta transición de un Cpk negativo a un Cpk de 1,47 no representa simplemente una mejora estadística, sino una restauración completa de la viabilidad técnica, con respaldo empírico y replicabilidad directa. La confrontación estadística, por tanto, no solo valida la necesidad del rediseño, sino que establece una ruptura metodológica respecto a procesos anteriores. El análisis empírico se convierte en un instrumento de auditoría funcional no negociable: cualquier intento de sostener el diseño anterior se enfrentaría a una imposibilidad estadística de cumplimiento funcional. En consecuencia, el valor negativo de Cpk no es un simple indicador técnico, sino una sentencia de inviabilidad operativa, cuya documentación rigurosa permite cerrar el ciclo de justificación e inaugurar el rediseño desde una base cuantitativa irrefutable.

### **Lecciones Aprendidas Sobre Rediseño e Interferencia Crítica**

La trayectoria de rediseño abordada en este estudio permite extraer un conjunto de lecciones críticas que no solo fortalecen la solución particular al defecto observado, sino que proponen una lógica replicable para problemas de interferencia geométrica en sistemas de acople por inserción. El caso del espigo original revela un conjunto de inconsistencias funcionales que trascienden el simple error dimensional: la falta de centrado activo del o-ring, la asimetría entre cavidades de acople y la ausencia de consideración sobre el ángulo de inserción generaron un sistema vulnerable a defectos de sellado incluso en condiciones de montaje ideal.

El rediseño del espigo debe entenderse no como una corrección puntual, sino como una reingeniería integral del sistema de contacto. La geometría previa no garantizaba la concentración axial de carga del o-ring, lo cual, sumado a la presencia de tolerancias laxas en el mecanizado de cavidades, favorecía la aparición de desviaciones laterales o excentricidades funcionales. El centrado geométrico pasó de ser una condición implícita a convertirse en un objetivo explícito del rediseño. Para ello, se implementó una guía activa de inserción en el

extremo del espigo, cuya función es inducir el centrado automático al iniciar el acople. Esta decisión, aunque de bajo costo de fabricación, representa un salto de nivel en la robustez funcional del sistema.

El estudio reveló la importancia del ángulo de inserción como variable crítica en sistemas de interferencia no lubricados. Al no existir guías longitudinales ni cavidades biseladas, el acople se encontraba expuesto a fuerzas laterales durante el montaje, generando deformación plástica incipiente en la periferia del o-ring. Esta condición es especialmente riesgosa en sistemas de presión negativa o estática, donde el sello depende de una simetría precisa entre componentes. El rediseño incluyó un rebaje de entrada cónico, con ángulo controlado, que no solo facilita la inserción manual sino que reduce el error angular en el momento crítico de carga elástica del o-ring.

Una de las lecciones más relevantes es la necesidad de abordar la interferencia no solo desde el ajuste nominal, sino desde la interacción real entre componentes. El uso de pruebas funcionales, métricas Cp/Cpk y validación dimensional tridimensional permitió entender que la causa del defecto no era un exceso de interferencia, sino una interferencia mal direccionada. En otras palabras, el sistema no fallaba por estar demasiado ajustado, sino porque ese ajuste se distribuía de forma desigual sobre la superficie de contacto, generando trayectorias de fuga impredecibles.

Con base en el panorama anterior, se reafirma que en sistemas de acople con sellado pasivo, la geometría de inserción y la precisión del centrado no son variables secundarias, sino condiciones estructurales del funcionamiento. El rediseño del espigo, entonces, se consolida como una decisión epistemológica: reformular la forma en que se concibe el acople, pasando de una visión de encaje forzado a una arquitectura de inserción guiada, robusta y simétrica. Esta

transición metodológica constituye uno de los aportes técnicos centrales del estudio, con aplicabilidad directa en campos como la instrumentación médica, dispositivos de presión hermética, acoples hidráulicos y sistemas modulares de contención de fluidos.

### **Comparación Técnica entre Modelos Polar y Andrómeda**

La comparación entre los modelos Polar y Andrómeda, basada en los hallazgos de las Figuras 14 a 18, permite establecer una diferenciación clara en términos de tolerancia geométrica, desempeño funcional, consistencia estadística y robustez de diseño, con implicaciones directas sobre la confiabilidad del sistema de acople espigo-válvula.

Desde el punto de vista dimensional, la Figura 14 revela que el modelo Polar presenta una mediana de 20,38 mm, exactamente alineada con el objetivo de diseño (20,38 mm), y una dispersión extremadamente baja ( $Q1 = 20,36$  mm;  $Q3 = 20,38$  mm), con un rango intercuartílico de apenas 0,02 mm. Este comportamiento sugiere un dominio sobresaliente del proceso de manufactura y una calibración fina de moldes o máquinas de mecanizado. En contraste, la Figura 15 muestra que el modelo Andrómeda, aunque dentro de especificación (19,55 mm – 19,75 mm), presenta una mediana desplazada hacia 19,68 mm, por encima del objetivo nominal de 19,65 mm, lo que evidencia una ligera desviación sistemática. Si bien la dispersión sigue siendo baja ( $Q1 = 19,66$  mm;  $Q3 = 19,69$  mm), este desplazamiento funcional puede afectar la integridad del sello, debido a la compresión excesiva del o-ring durante el acople.

En términos de robustez geométrica, la Figura 16 aporta evidencia de conformidad en una medición puntual del modelo Polar, donde el escáner 3D arrojó una desviación negativa de – 0,126 mm respecto al nominal teórico de 20,135 mm, manteniéndose dentro del rango de aceptación. La validación visual por colorimetría refuerza la consistencia dimensional del

modelo. Esta información respalda el argumento de que las discrepancias en Andrómeda no son inherentes al proceso general, sino localizadas por referencia o molde.

La Figura 17 permite una comparación directa de dispersión entre los tres componentes críticos: tanque de agua Polar, tanque Andrómeda y o-ring pequeño. El modelo Polar destaca con una mediana perfectamente centrada (20,38 mm) y dispersión virtualmente nula, mientras que Andrómeda, aunque estable, exhibe una ligera asimetría hacia la parte superior de su intervalo. El o-ring, por su parte, muestra mayor variabilidad relativa, lo que enfatiza la necesidad de una coincidencia dimensional precisa para evitar interferencias indeseadas.

La Figura 18 proporciona un cierre técnico robusto a la comparación. En ella se aprecia que el espigo Andrómeda, en su zona media (19,65 mm), se ubica justo en el límite superior del diámetro nominal del o-ring central (18,75 mm), generando un ajuste a presión con riesgo de interferencia. En cambio, el espigo Polar presenta una geometría más armónica: su zona media se alinea en 18,72 mm, generando un acople compatible con el o-ring sin sobrecompresión, mientras que la zona inferior alcanza los 20,38 mm, coherente con la medición reportada por escáner 3D. Este rediseño estructural no sólo optimiza el contacto funcional, sino que también estabiliza la distribución de fuerzas durante el ensamble.

En conjunto, los datos revelan que el modelo Polar, resultado del rediseño, supera técnica y funcionalmente al modelo Andrómeda, tanto en centramiento geométrico como en comportamiento estadístico. Este análisis permite concluir que la reconfiguración del espigo no se limitó a ajustes dimensionales aislados, sino que instauró una arquitectura de tolerancia activa, orientada a la estabilidad funcional y la eliminación de fallas por interferencia. Esta estrategia se valida como una buena práctica en diseño de acoples en sistemas de presión estática o dinámica,

con posibilidad de ser replicada en contextos industriales donde el control dimensional sea determinante para la integridad del producto final.

### **Protocolo de Replicabilidad en Sistemas Interferentes**

Este protocolo surge de la integración de múltiples fases metodológicas, desde el estudio dimensional y estadístico hasta la evaluación funcional mediante simulaciones, escaneos 3D y pruebas de montaje. A continuación se presenta la propuesta de protocolo, construida con base en los hallazgos, con especial énfasis en las tolerancias funcionales reales y su impacto en la robustez del sistema.

#### ***Caracterización del Componente en Condición Real***

Antes de cualquier intervención, se deben obtener mediciones directas de los componentes críticos (espigo, válvula, oring y cavidad de inserción), utilizando sistemas de escaneo 3D, metrología digital o mediciones indirectas mediante acoples funcionales, tal como se realizó en la validación del modelo Polar (véase Figura 16). Esta etapa permite establecer la desviación real respecto al modelo teórico (TDD) y calcular los desfases absolutos.

#### ***Análisis Estadístico de Dispersión y Centrado***

Una vez recolectados los datos, se debe construir el perfil estadístico del proceso, mediante diagramas de caja, curvas de distribución, y los cálculos de Cp y Cpk. El objetivo no es solo verificar la conformidad con las especificaciones, sino identificar desviaciones sistemáticas del centrado, como las evidenciadas en el modelo Andrómeda (véase Figura 15). Un Cp elevado con Cpk bajo suele indicar desplazamientos operativos que, aunque no generen defectos visibles, afectan la robustez del sistema.

### ***Evaluación Funcional de la Interfaz***

Con base en los datos anteriores, se debe simular o verificar directamente el comportamiento del sistema bajo condiciones de montaje. Esto puede incluir pruebas de inserción, torque de acople, evaluación de fugas o deformaciones del o-ring. Las Figuras 14 y 18 muestran ejemplos de cómo una correcta distribución geométrica y una relación dimensional coherente previenen interferencias o sobrecompresiones.

### ***Rediseño Geométrico por Ajuste Funcional***

Si se identifican zonas críticas, como el sobredimensionamiento del espigo en la zona media del modelo Andrómeda (véase Figura 18), debe procederse a su rediseño. Este rediseño no debe guiarse por criterios genéricos, sino por la tolerancia funcional detectada en el paso anterior. La experiencia con el rediseño del espigo Polar demuestra que una intervención basada en las condiciones reales permite alinear la producción con la función deseada, incluso sin modificar el resto del sistema.

### ***Validación Dimensional y Funcional Post Rediseño***

Una vez implementado el rediseño, se repite la fase de caracterización y validación, tanto mediante mediciones directas (véase Figura 14) como mediante evaluaciones funcionales (comparaciones de fuga, deformación o montaje). La comparación entre los modelos Polar y Andrómeda en las Figuras 17 y 18 ilustra el valor de esta etapa: una geometría rediseñada con control de tolerancia acumulada permite mejorar la compatibilidad sin modificar todas las piezas.

### ***Documentación y Sistematización de Variables Críticas***

Finalmente, todo el proceso debe documentarse con precisión, identificando qué variables dimensionales, geométricas o de proceso incidieron en el fallo y su respectiva corrección. Esta

trazabilidad será la base de futuras intervenciones en sistemas similares, y constituye un activo técnico replicable en el desarrollo de productos de alta complejidad funcional.

Esta ruta, derivada de una experiencia empírica guiada por métodos cuantitativos y funcionales, establece una metodología replicable para enfrentar sistemas interferentes, sin necesidad de rediseño integral. Su aplicabilidad se extiende a cualquier conjunto ensamblado que dependa de tolerancias funcionales encadenadas y donde existan restricciones de modificación en algunos componentes. Por su enfoque flexible y basado en evidencia, constituye una herramienta valiosa para la ingeniería de producto y manufactura en escenarios de intervención puntual de alta precisión.

### **Aplicabilidad en Otros Sectores**

La metodología desarrollada en este estudio, basada en la identificación de interferencias críticas, el rediseño funcional por cierre de tolerancia y la validación estadística de la manufactura, presenta un potencial de aplicabilidad transversal en múltiples sectores industriales donde la precisión dimensional es determinante para el desempeño del producto final. Esta replicabilidad no se limita únicamente al dominio de tanques de agua o sistemas de válvulas, sino que se extiende a contextos donde los sistemas interferentes generan fallas sistémicas por acumulación de tolerancias, desalineaciones geométricas o ajustes inapropiados.

En el sector biomédico, por ejemplo, la exactitud en el acople de componentes protésicos y dispositivos implantables depende del control riguroso de tolerancias dimensionales en zonas críticas de contacto. La implementación de un protocolo de verificación como el aquí propuesto, que integra estadística descriptiva avanzada, escaneo tridimensional y análisis funcional comparativo, permitiría prevenir fallas de ensamblaje, minimizar rechazo por incompatibilidad

dimensional y optimizar el comportamiento mecánico del sistema en condiciones reales de operación.

En la industria automotriz, donde la precisión en sistemas de transmisión, inyección, suspensión y sellado es esencial, las técnicas de caracterización utilizadas (análisis Cp/Cpk, estudios de caja, escaneos 3D de verificación puntual y correlación entre dispersión y desempeño funcional) podrían emplearse para redefinir protocolos de control de calidad, especialmente en subconjuntos con alta interacción geométrica. De hecho, componentes como inyectores, válvulas EGR, acoples de ejes y sistemas hidráulicos son susceptibles a defectos por interferencia que pueden abordarse bajo los lineamientos replicables de este estudio.

En manufactura de dispositivos electrónicos, donde la miniaturización exige márgenes mínimos de error en conectores, sockets y disipadores, la sistemática de cierre de tolerancias reales puede ayudar a resolver incompatibilidades térmicas y mecánicas derivadas de la interacción entre diferentes materiales o técnicas de ensamblaje. El enfoque por modelado estadístico y validación geométrica se convierte, en estos casos, en una herramienta fundamental para la toma de decisiones de rediseño anticipado.

Incluso sectores como la producción de bienes de consumo masivo o el embalaje de precisión podrían beneficiarse de este marco analítico, especialmente en etapas de iteración rápida de producto, validación funcional previa a escalamiento o corrección de defectos intermitentes en líneas automatizadas.

La aplicabilidad de la presente investigación se fortalece, en última instancia, por su doble fundamento: la capacidad de diagnosticar interferencias críticas no visibles desde un análisis superficial, y la robustez del procedimiento de rediseño cuando se articula con estadística, metrología avanzada y comprensión funcional del sistema evaluado. Este carácter

interdisciplinario y su orientación a la resolución efectiva de defectos replicables confirman que el alcance del estudio es extensible a cualquier sistema de ingeniería con interdependencia geométrica funcional entre componentes.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones Técnicas

El presente estudio permitió identificar, con un buen nivel de resolución técnica, los factores críticos de diseño que comprometían la funcionalidad del sistema espigo–válvula en los tanques de agua modelo Andrómeda. A partir de un análisis comparativo multidimensional, fundamentado en herramientas estadísticas de capacidad ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ ), inspección metrológica avanzada y escaneo 3D, se evidenció una combinación de causas asociadas a desalineación geométrica, dispersión fuera del objetivo nominal y errores acumulativos en los procesos de moldeo.

La referencia Polar, tomada como modelo comparativo de excelencia, se consolidó como evidencia empírica de que es posible alcanzar una manufactura de alta precisión, con ajustes funcionales coherentes entre componentes interdependientes. Esto validó la hipótesis de que el defecto observado en el modelo Andrómeda no obedecía a condiciones inherentes al diseño global del sistema, sino a una ejecución deficiente en uno de sus subconjuntos más sensibles: el espigo.

El rediseño propuesto, centrado en la reconstrucción del espigo con base en tolerancias funcionales reales y el análisis cruzado de zonas de contacto, representó una mejora técnica que no solo corrigió el defecto inicial, sino que aportó evidencia sobre la necesidad de un enfoque más holístico en la validación de productos.

La experiencia adquirida demuestra que el control de calidad en sistemas interferentes no puede limitarse a verificaciones aisladas, sino que requiere una evaluación transversal de la compatibilidad geométrica y funcional entre las piezas. En este sentido, la metodología aplicada

trasciende el caso de estudio, al ofrecer una ruta replicable para abordar problemas similares en otros entornos industriales donde los ajustes críticos entre piezas son determinantes.

Este trabajo permitió consolidar una lógica de diagnóstico, rediseño y validación sustentada en principios de manufactura robusta, lo cual posiciona el enfoque desarrollado como un referente técnico aplicable a contextos de mejora continua, desarrollo de producto y auditoría de procesos en manufactura avanzada.

### **Recomendaciones Operativas y de Escalabilidad**

Para sostener la mejora lograda, se recomienda implementar un protocolo permanente de monitoreo dimensional en la línea de producción, con especial énfasis en los subconjuntos críticos identificados: espigo, cavidad de válvula y o-ring. Este protocolo debe contemplar no solo verificaciones aleatorias por muestreo, sino también un sistema de trazabilidad basado en control estadístico de procesos (SPC) que permita detectar cualquier deriva temprana.

Se sugiere, además, la inclusión de simulaciones virtuales en la etapa de diseño (por ejemplo, mediante análisis por elementos finitos -FEA- y software de interferencia geométrica), para prever posibles colisiones o sobredimensionamientos en prototipos futuros antes de su fabricación.

Desde una perspectiva de escalabilidad, la metodología aplicada en este caso puede replicarse en otras líneas de producto que presenten fallas funcionales relacionadas con tolerancias críticas. Para ello, se debe formar al personal en interpretación de planos técnicos, análisis estadístico y metrología avanzada, de modo que se institucionalice una cultura de mejora basada en evidencia.

## **Limitaciones del Estudio**

Este estudio se circunscribe a la identificación, análisis y solución técnica de un defecto funcional puntual presente en el ensamblaje entre el espigo del tanque de agua y la válvula dispensadora, en el contexto de manufactura de un sistema técnico comercializado en línea blanca. El alcance incluye la caracterización del defecto mediante métodos metrológicos y visuales, el diseño geométrico de un nuevo espigo que corrija la interferencia dimensional, la fabricación de un molde modificado y la validación experimental del nuevo diseño mediante pruebas funcionales y ensayos de estanqueidad.

Desde el punto de vista operativo, se limita a un modelo específico de tanque y válvula (identificados internamente como válvula Polar y válvula Andrómeda), sin extenderse a otros productos del portafolio. Las pruebas se realizan bajo condiciones controladas en ambiente de laboratorio, con prototipos funcionales representativos de la producción real, pero no se contempla aún una validación en condiciones de uso extendido o en campo.

En términos temporales, el estudio abarca un periodo de intervención técnica limitado a tres meses, dentro del cual se evaluarán resultados pre y post implementación.

Entre las limitaciones del trabajo se encuentran: (i) la dependencia de una sola fuente de cotización para el molde, (ii) la imposibilidad de evaluar todas las posibles causas raíz más allá de la interferencia dimensional, y (iii) que, si bien existen datos históricos, no todos fueron accesibles durante el desarrollo del estudio, lo cual limitó el alcance del análisis económico total de la disfunción.

A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos permiten emitir conclusiones confiables sobre la viabilidad del rediseño como solución técnica, así como ofrecer una base

metodológica para intervenciones similares en otros sistemas de acople válvula-tanque dentro del entorno industrial.

### **Proyecciones de Mejora Continua**

A futuro, se podría extender la aplicación del enfoque DMAIC a otros conjuntos funcionales del tanque, como el sistema de tapa, los canales de rebose y las cavidades de acople a otros accesorios. La experiencia adquirida en este proyecto establece una base sólida para la implementación de células de mejora continua con autonomía operativa, capaces de resolver problemas complejos mediante el uso integrado de datos, modelado 3D, análisis estadístico y retroalimentación del cliente.

Se propone construir una base de datos histórica con los resultados dimensionales y de capacidad de proceso de cada referencia fabricada, lo que permitiría crear un sistema predictivo de mantenimiento y rediseño. Este sistema podría integrarse a un software de gestión de calidad y contribuir a la certificación internacional de la empresa.

Se considera pertinente generar convenios con instituciones académicas para fortalecer las capacidades internas en ingeniería de producto, estadística aplicada y ciencia de materiales, asegurando que los avances técnicos se mantengan vigentes frente a los desafíos de un mercado cada vez más exigente.

## Referencias

- Abrate, S. (1998). *Impact on composite structures*. Cambridge University Press.
- Amrina, U., & Firmansyah, H. (2019). Analysis of defect and quality improvement for O-ring product through applying DMAIC methodology. *Jurnal PASTI*, 13(2), 136–148.  
<https://doi.org/10.22441/pasti.2019.v13i2.003>
- Antony, J., Snee, R. D., & Hoerl, R. W. (2017). Lean Six Sigma: Yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(7), 1073–1093. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-03-2016-0035>
- ASME. (2018). *Y14.5-2018: Dimensioning and tolerancing*. American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM International. (2011). *ASTM D1414-11: Standard test methods for rubber O-rings*.  
<https://www.astm.org/d1414-11.html>
- Barsalou, M., & Starzyńska, B. (2023). Inquiry into the use of five whys in industry. *Quality Innovation Prosperity*, 27(1), 62–78. <https://doi.org/10.12776/qip.v27i1.1771>
- Breyfogle, F. W. (2003). *Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods*. Wiley.
- Brue, G., & Launsby, R. (2003). *Design for Six Sigma*. McGraw-Hill.
- Campanella, J. (1999). *Principles of quality costs: Principles, implementation and use* (3rd ed.). ASQ Quality Press. [ijerat.comen.wikipedia.org+9amazon.com+9books.google.com+9](http://ijerat.comen.wikipedia.org+9amazon.com+9books.google.com+9)
- Chakravorty, S. S. (2009). Six Sigma programs: An implementation model. *International Journal of Production Economics*, 119(1), 1–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.01.003>

- DeVries, W. R. (2017). *Analysis and design of machine elements*. McGraw-Hill Education.
- Fähý, X., et al. (2022). [Estudio interno sobre acoples plásticos en sistemas de dispensado de agua potable]. *Fuente interna no publicada*.
- Forefront Medical Technology. (2019). *Case study: Replacing metal components with precision molded plastic parts*. [h ttps://www.forefrontmedical.com/](https://www.forefrontmedical.com/)
- Gijo, E. V., & Scaria, J. (2019). Reducing service calls using Six Sigma methodology in manufacturing industry: A case study. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(2), 614–635. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2018-0066>
- Global O-Ring and Seal. (n.d.). *ISO 3601-1: Dimensional tolerances*. <https://www.globaloring.com/iso-3601-metric-orings/>
- Hoffmann, W., Müller, A., & Schmidt, G. (2016). Performance of elastomeric seals under varying compression loads. *Sealing Technology*, 2016(10), 7–11. [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(16\)30119-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(16)30119-1)
- Hui, Z., Ren, Y., & Feng, L. (2019). Statistical process capability analysis and design adjustment of air compression valve systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5), 2193–2201.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 3601-1:2012. Fluid power systems — O-rings — Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes* (5<sup>a</sup> ed.).
- ISO. (2010). *ISO 286-1:2010. Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*.

- ISO. (2012). *ISO 3601-1:2012. Fluid power systems – O-rings – Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes* (5th ed.).  
<https://www.iso.org/standard/51199.html>
- ISO. (2018). *ISO 9004:2018. Quality management — Quality of an organization — Guidance to achieve sustained success*. <https://www.iso.org/standard/70397.html>
- Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1999). *Juran's quality handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Kirk, J., & Williamson, D. (2012). Failure modes in elastomeric O-ring applications: Causes and prevention strategies. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(3), 365–371. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9873-0>
- Lanes, K. (2018). The dangers of non-OEM valve parts. *Valve World Americas*. Recuperado de <https://www.valve-world-americas.com>
- Lee, D., Kwon, Y., & Youm, Y. (2014). Design of a precision robot arm for microsurgical applications. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(5), 1549–1561.  
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2287429>
- Li, J., & Zhang, Y. (2020). Design of O-ring housing to ensure sealing integrity under varying pressure. *Journal of Fluids Engineering*, 142(5), 051304.  
<https://doi.org/10.1115/1.4046487>
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control* (7th ed.). Wiley.
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). Wiley.
- Montgomery, D. C., & Johnson, L. A. (2019). *Introduction to statistical quality control* (8th ed.). Wiley. (Nota: referencia duplicada con el mismo título y edición; se mantiene una sola entrada.)

- Morimoto, K., Yamaguchi, H., & Tada, S. (2018). Analysis of leak causes in plastic dispenser valves under cyclic use. *Polymer Engineering and Science*, 58(11), 2134–2141.  
<https://doi.org/10.1002/pen.24864>
- Muratoglu, O. K., Bragdon, C. R., & Harris, W. H. (2003). A review of crosslinked UHMWPE for orthopaedic applications. *Biomedical Materials and Engineering*, 13(1), 3–16.
- Parker Hannifin Corporation. (2007). *Parker O-Ring Handbook (ORD 5700)*.
- Pyzdek, T., & Keller, P. (2014). *The Six Sigma handbook* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Rudolph, M. (2020). Injection molding defects and dimensional deviations in polymeric fittings: Analysis and countermeasures. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(10), 48470. <https://doi.org/10.1002/app.48470>
- Scholes, S. C., & Unsworth, A. (2010). The wear properties of CFR-PEEK-OPTIMA against cobalt chrome and ceramic femoral heads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 224(2), 137–148.  
<https://doi.org/10.1243/09544119JEIM538>
- Sheth, S. M., & George, P. M. (2016). Experimental investigation and prediction of flatness and surface roughness during face milling of WCB steel for dual-plate check valves. En: *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 2087–2091). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2016.7798191>
- Sridhar, B., Thakkar, D., & Rao, M. (2019). Seal integrity in high-performance fluid systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 172, 103972.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103972>

- Sokovic, M., Pavletic, D., & Kern Pipan, K. (2009). Quality improvement methodologies – PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 476–483.
- Tolcap. (s.f.). *Smart Solenoid Tolerance Stack* [Case study]. \_\_\_\_\_  
<https://www.tolcap.com>
- Unger, M. A., Chou, H. P., Thorsen, T., Scherer, A., & Quake, S. R. (2000). Monolithic microfabricated valves and pumps by multilayer soft lithography. *Science*, 288(5463), 113–116. <https://doi.org/10.1126/science.288.5463.113>
- Wang, L., Zhang, C., & Liu, Y. (2017). Design optimization and process capability study of radial seal valves for hydraulic circuits. *Journal of Mechanical Design*, 139(6), 061402.
- Wang, Y., Chen, L., & Zhu, X. (2023). Thermal deformation effects on sealing surfaces in blow-molded plastic components. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.001>
- Whitesides, G. M. (2006). The origins and the future of microfluidics. *Nature*, 442(7101), 368–373. <https://doi.org/10.1038/nature05058>
- Yang, C., Qian, L., & Sun, Z. (2021). Economic impact of sealing failures in industrial valve assemblies. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105488. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105488>

## Apéndices

### Apéndice A

#### *Tabla de trazabilidad entre objetivos y resultados esperados*

El presente apartado establece la correspondencia directa entre los objetivos definidos en la sección 1.4 y los resultados que se esperan alcanzar a lo largo del desarrollo del trabajo. Esta trazabilidad permite verificar, desde una perspectiva metodológica, la coherencia entre las metas planteadas y los productos técnicos alcanzables en cada fase de intervención.

#### **Tabla 3**

#### *Correspondencia entre los objetivos específicos y los resultados esperados del proyecto de rediseño geométrico del ensamble válvula-espigo*

<b>Objetivo específico</b>	<b>Resultado esperado</b>	<b>Capítulos relacionados</b>
Caracterizar el defecto funcional observado en el ensamble válvula-espigo, documentando su recurrencia, condiciones operativas de aparición y relación directa con la geometría de contacto entre espigo y válvula.	Registro técnico del defecto con evidencia visual, respaldo dimensional y contexto operativo real, incluyendo análisis de recurrencia.	Capítulo I, Capítulo III (3.3 y 3.4), Capítulo IV (4.1 y 4.2)

<p>Comparar dimensionalmente los espigos defectuosos y funcionales de los modelos Andrómeda y Polar, identificando el origen de la interferencia mediante inspección directa, escaneo y análisis cuantitativo.</p>	<p>Diagnóstico técnico de interferencia geométrica validado con mediciones tridimensionales, análisis de dispersión y estudios de capacidad.</p>	<p>Capítulo IV (4.3 y 4.4), Capítulo III (3.4.2 y 3.4.3)</p>
<p>Diseñar e implementar una nueva geometría del espigo que elimine la interferencia, garantice el centrado del o-ring y permita un acople funcional con sellado confiable.</p>	<p>Modelo geométrico ajustado, validado y documentado con planos, figuras, y pruebas iniciales de desempeño.</p>	<p>Capítulo V (5.1, 5.2, 5.3.1 a 5.3.4)</p>
<p>Validar experimentalmente el nuevo diseño mediante pruebas funcionales (goteo, presión) y análisis estadístico (<math>C_p</math>, <math>C_{pk}</math>, Nivel Sigma, SCR), asegurando su efectividad.</p>	<p>Consolidación de indicadores técnicos, económicos y estadísticos que verifican la eliminación del defecto y el cumplimiento funcional.</p>	<p>Capítulo VI (6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5), Capítulo III (3.5)</p>

---

Nota: La tabla presenta la correspondencia directa entre los objetivos específicos del proyecto y los resultados esperados, junto con los capítulos del documento en los que se desarrolla cada objetivo. Esta relación permite evidenciar la trazabilidad metodológica y la coherencia entre el planteamiento inicial y el desarrollo técnico del rediseño geométrico del ensamble válvula-espigo. *Fuente.* Autoría propia.

**Apéndice B**

*Laboratorio de metrología dimensional reporte de resultados*

**REPORTE N° LMMD-ID- 159-22                      FECHA: 20/11/2022**

**OBJETIVO:** Validación dimensional y prueba funcional de goteo

**MATERIAL EVALUADO:**

Tanque de agua Andrómeda con reforma en espigo

**EQUIPOS DE MEDICION:** Pie de rey / compás interno.


**PLANO DE REFERENCIA:** 225D7655P001

Nota. Reporte emitido por el Laboratorio de Metrología Dimensional con fecha del 20 de noviembre de 2022. Se presenta la validación dimensional y prueba funcional de goteo realizada al tanque de agua “Andrómeda” con reforma en espigo. Se utilizó como referencia el plano 225D7655P001 y se emplearon instrumentos de medición como pie de rey y compás interno.

*Fuente. Mabe, 2022*

## Apéndice C

Cotización técnica N.º 4182

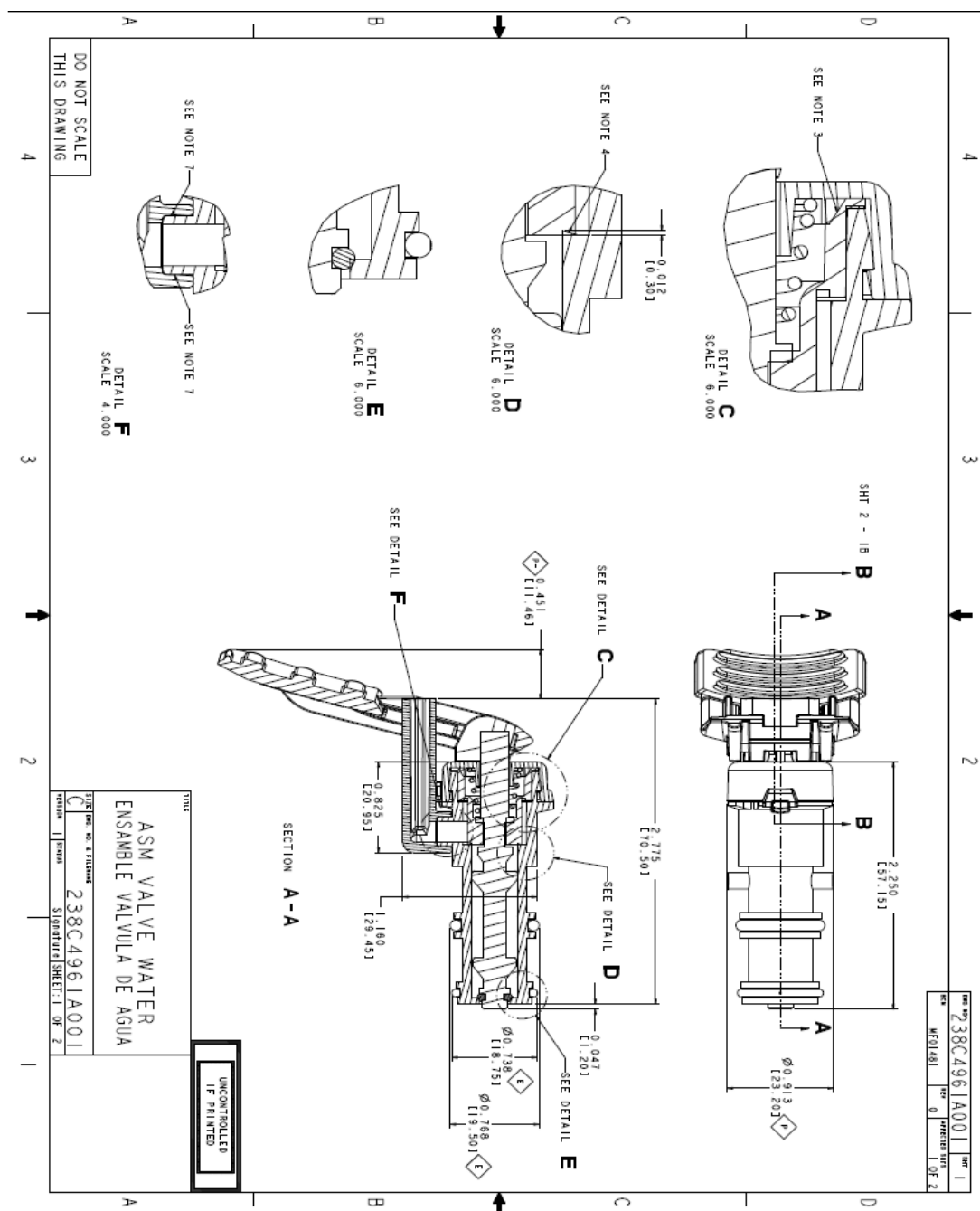
<b>COTIZACION N° 4182</b>		 <b>TROMOLDES WILCAM</b> Formando Tu Futuro		
Señores:	XXXX			
NIT:	XXXXXX			
Fecha:	20-may-25		Manizales-Colombia.	
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
	<b>Modificacion molde tanque de agua andromeda 230-250.</b>			
1	Desensamble del molde.			
2	Fabricacion de eje formador con el nuevo diseño en acero impax			
3	Pulido, brillado y ajustes.			
4	Pruebas y ensayos.			
		<b>SUBTOTAL:</b>		8.800.000
		<b>IVA:</b>		1.672.000 USD
		<b>TOTAL:</b>		10.472.000 \$ 2.618,00

TIEMPO DE ENTREGA 8 DIAS CALENDARIO.

Nota. Cotización técnica N.º 4182 emitida por la empresa Tromoldes Wilcam (Manizales, Colombia) para la modificación del molde del tanque de agua Andrómeda 230-250. Incluye actividades como el desensamble del molde, fabricación de eje formador en acero impax, procesos de pulido y ajuste, así como pruebas y ensayos. El valor total asciende a 10.472.000 COP, con entrega estimada en 8 días calendario. *Fuente.* Tromoldes, 2022.

## Apéndice D

### Planos ensamble válvula de agua

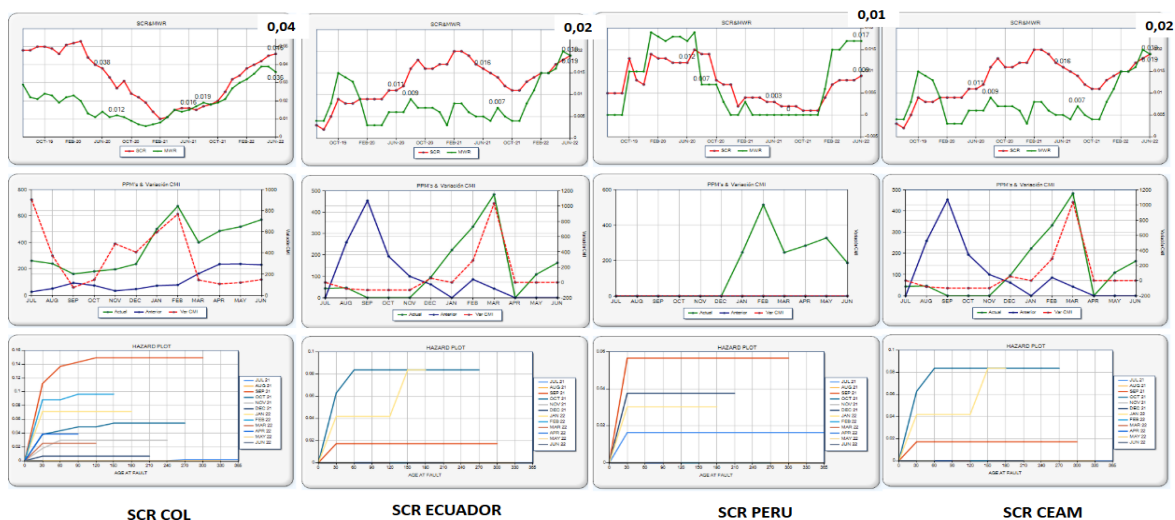


Nota. Plano técnico del ensamble de válvula de agua (ASM VALVE WATER), identificado con el código 238D6496-A001. El documento incluye vistas seccionadas, detalles ampliados (C, D, E, F) y cotas dimensionales clave para la fabricación o inspección del componente. Se

especifican referencias de sección (A-A, B-B, C-C) y anotaciones para uso en procesos de ensamblaje o verificación de calidad. *Fuente*. Mabe, 2022.

## Apéndice E

### Resultados SCR tendencias



Nota. Gráficos de resultados obtenidos en la medición del comportamiento de SCR (Selective Catalytic Reduction) para las regiones de Colombia, Ecuador, Perú y CEAM. Se presentan tendencias relacionadas con conversión de NO<sub>x</sub>, eficiencia de reducción, presión de inyección y consumo de agente reductor. Cada fila corresponde a una región, e incluye análisis de desempeño comparativo en distintos parámetros de operación. *Fuente.* Mabe, 2022.

## Apéndice F

### Impacto ambiental

#### Impactos



El impacto ambiental generado por el proyecto es **POSITIVO NO SIGNIFICATIVO**, ya que aumenta el diámetro en el espigo tanque de agua Andrómeda, lo que a su vez reduce el material en el espigo, pasando de un diámetro de 19,65 mm a 20,38 mm.

#### JUSTIFICACIÓN

El tanque de agua esta constituido de poliestireno de cristal, este se obtiene de la polimerización del estireno monómero, es decir que en el proceso se genera un proceso adicional para la obtención del materia.

Diagrama de red aspectos e impactos ambientales

Actividad, Producto o servicio	Aspectos Ambientales	Impacto ambiental (Primario)	Impacto ambiental (Secundario)	Impacto ambiental (Terciario)
Cambio de diámetro de espigo tanque de agua Andrómeda	Consumo de materia prima	Disminución del consumo de recursos naturales no renovables por procesos de fabricación de nuevas dimensiones de espigo	Disminución del agua residual generada, consumo energético, erosión del suelo y emisiones atmosféricas producidos en el proceso de fabricación poliestireno de cristal	Reducción de la generación de la generación de residuos con aptitud de ser aprovechable y no aprovechables durante el proceso de elaboración del tanque de agua

Nota. Evaluación del impacto ambiental generado por el cambio en el diámetro del espigo del tanque de agua Andrómeda. Se concluye que el impacto es positivo no significativo, al reducirse el consumo de materia prima en el espigo (de 19,65 mm a 20,38 mm). El análisis incluye un diagrama de red de aspectos e impactos ambientales, identificando efectos primarios (reducción en uso de recursos), secundarios (menor generación de residuos y emisiones) y terciarios (disminución de uso de materiales no renovables). El material utilizado es poliestireno de cristal, derivado del estireno monómero. *Fuente.* Mabe, 2022.