

Viabilidad del uso de PET reciclado para envases cosméticos de 100 ml mediante el proceso de inyección-soplado



Nelson Augusto Santuario Robayo

Seminario de Investigación, Ingeniería

Universidad EAN

Bogotá, D. C.

2026

Contenido

1. introducción.....	4
2. Planteamiento del problema.....	6
3. Identificación de variables técnicas y contextuales	8
4. Delimitación del problema	9
5. Pregunta de investigación	10
6. Objetivos	10
6.1 Objetivo general	10
6.2 Objetivos específicos	10
7. Justificación	11
8. Antecedentes investigativos	12
8.1 Estudios sobre el comportamiento técnico del rPET en inyección-soplado	12
8.2 Estudios sobre PCR aplicado a empaque cosmético	14
8.3 Investigaciones desarrolladas en el contexto colombiano	15
9. Marco institucional	16
10. Marco teórico	16
10.1 Polietileno tereftalato (PET): estructura y propiedades de procesamiento	17
10.2 PET reciclado posconsumo (rPET o PET-PCR)	18
10.3 Inyección-soplado (ISBM): fundamentos del proceso	19
10.4 Viabilidad técnica industrial	20
10.5 Calidad del envase cosmético	21
10.6 Economía circular aplicada al envase plástico.....	21
11. Diseño metodológico	22
11.1 Enfoque y tipo de estudio	22
11.2 Esquema general del diseño metodológico	23
11.3 Técnicas de recolección de datos	25
11.4 Instrumentos de recolección	25
11.5 Procedimiento	26
11.6 Plan de análisis	27
11.7 Criterio de viabilidad técnica	27
11.8 Cronograma	28
12. Resultados de la investigación	28
12.1 Caracterización del material de entrada.....	28
12.2 Ajuste de las condiciones de proceso	29
12.3 Cumplimiento dimensional del envase	31
12.4 Cumplimiento visual del envase	36
12.5 Compatibilidad con etiqueta envolvente.....	38

12.6 Cumplimiento funcional del envase	39
12.7 Estabilidad operativa del proceso	40
13. Análisis de resultados	41
14. Conclusiones	41
15. Recomendaciones	42
16. Referencias	43
Anexos	46

1. Introducción

La acumulación de residuos plásticos es el problema ambiental el más importante de los últimos tiempos. La fabricación mundial de plásticos registro de 234 millones de toneladas en el año 2000 aproximadamente 460 millones en el año 2019, mientras que los residuos producidos crecieron en proporción similar y alcanzaron los 353 millones de toneladas (OECD, 2022). El inconveniente no se minimiza en la cantidad, pese a los logros en gestión de sobrantes, apenas un 9% del plástico botado en el mundo termina reciclado. El resto se apila en rellenos sanitarios, se quema o se bota hacia ecosistemas marinos y terrestres, lo que ha obligado a los gobiernos, empresas y consumidores a buscar por modelos productivos basados en economía cero residuos.

En la región de latinoamericana, la ley regulatoria y comercial se ha aumentado. En países de Latinoamérica entre ellos Colombia, Chile y México, han empezado a exigir contenido recuperado mínimo en empaques o han decretado metas para aprovechar este proceso. La industria del cuidado personal, en particular, ha tomado posición frente a esta exigencia: empresas globales como Unilever, L'Oréal y Natura han fijado compromisos públicos para incorporar PET reciclado posconsumo en sus envases antes de 2030. Esto crea una demanda tangible de soluciones técnicas y de proceso que permitan procesar resinas recuperadas sin reducir la calidad final del producto.

En Colombia se adelantó por la normativa con la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) y la Resolución 1407 de 2018, con dos normas que establecen responsabilidad propia del fabricante sobre los desechos de envases y empaques (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018 y 2019). Actualmente, esto se ha mejorado con el crecimiento en el aumento del reciclaje de este polímero: durante 2023 se reportó el reciclaje de 935.106 toneladas de plástico en el país, de las cuales 283.531 toneladas correspondieron a PET, equivalente al 30,32% del total recuperado para su transformación nuevamente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023).

El PET reciclado dejó de ser un material basura para convertirse en un material industrial con cadena de suministro conocida por la industria nacional y mundial.

Sin embargo, que exista PET reciclado disponible no es factible que se pueda utilizar tan fácilmente para producir los distintos tipos de botellas y envases para la industria actual.

En los envases para productos cosméticos las exigencias de calidad son mucho mayores que en otros envases, como los utilizados para embotellar agua. No solo deben proteger el producto, si no también conservar una buena apariencia, mantener transparencia y cumplir con las dimensiones establecidas, adicional tienen que soportar todo el proceso de fabricación, desde el llenado, etiquetado, el almacenamiento y el transporte sin perder sus características incluso cuando se distribuyen a diferentes ciudades o países

Cuando se incorpora el PET reciclado inician nuevos retos y como este material ya paso por el uso y reciclaje, varias de sus propiedades pueden cambiar. Existe la posibilidad de queden pequeñas impurezas, conocidas como puntos negros, que afectan la estética del envase. En algunos casos, estos cambios también pueden influir en sus dimensiones y disminuir su resistencia a los golpes durante el transporte o manipulación,

A partir de esta necesidad se crea esta investigación, el propósito es comprobar si una mezcla de 30% de PET reciclado posconsumo con un 70% de PET virgen se pueda utilizar para fabricar envases para shampoo de capacidad volumétrica de 100 mililitros y con una boca estandarizada de 24-410 milímetros, esto sin afectar las especificaciones de calidad que exigen los clientes, para responder esta pregunta se realizó una prueba piloto utilizando la tecnología de inyección estirado, posteriormente los envases obtenidos se evaluaron para verificar su apariencia, sus dimensiones y su comportamiento durante el proceso de fabricación.

Con esta información se busca determinar si esta mezcla puede convertirse en una alternativa viable para futuros desarrollos de envases con material PET reciclado.

2. Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas ambientales de la actualidad es el uso masivo del plástico para fabricar envases y plásticos. Esta problemática ha generado una gran cantidad de residuos que afectan el medio ambiente y representan un problema importante para la gestión de los desechos plásticos.

Durante los últimos años, tanto en Colombia como en otros países se han impulsado campañas de educación y sensibilización para promover el reciclaje, sin embargo, los resultados son muy limitados, según la OECD (2022) solo el 9% de los residuos plásticos que se generan en el mundo vuelven a aprovecharse en los nuevos procesos industriales, esto significa que la mayor parte del plástico termina desechándose después de un solo uso.

Frente a esta cruda realidad, los gobiernos y la industria han buscado diferentes alternativas para darle un mejor aprovechamiento a estos materiales. Una de las más importantes es incorporar plástico reciclado en la fabricación de nuevos productos. Con ello se busca disminuir el consumo de materia prima virgen y aprovechar materiales que antes terminaban en residuos que no se aprovechaban. En Colombia también se han puesto en marcha diferentes acciones para fortalecer el reciclaje. La Estrategia Nacional de Economía Circular y la resolución 1407 del año 2018 promueven el aprovechamiento de los residuos de los envases y empaques, además de incentivar el uso de materiales reciclados en nuevos procesos de fabricación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018-2019). Con estas iniciativas han mostrado resultados positivos, de acuerdo con la superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2023), durante el año 2023 se aprovecharon 283.500 toneladas de plástico PET, equivalentes al 30,30% del plástico recuperado en el país, de igual manera Zapata Bravo et al. (2021) evidencia que el PER reciclado ya se está utilizando por diferentes empresas en Colombia, impulsado por el desarrollo de la normatividad y el crecimiento de la industria del reciclaje.

No obstante, recuperar el PET es solo el primer paso. El verdadero reto comienza cuando este material debe utilizarse para fabricar los nuevos envases. En este punto ya no basta con

disponer de material reciclado, también es necesario demostrar que cumplen las mismas especificaciones de calidad que exige un envase fabricado con PET virgen.

En la industrial de los cosméticos los envases deben cumplir con un buen acabado exterior, transparencia uniforme, estabilidad en su forma y los menos defectos visibles posibles. Adicional debe ser funcionales durante las etapas posteriores del proceso como el etiquetado envolvente o una alternativa como la impresión por serigrafía.

Diferentes estudios han dado como resultado que el uso del PET reciclado posconsumo (PCR) afectan algunas propiedades del material, como la viscosidad intrínseca o también conocida como el índice de Staudinger, la estabilidad térmica y el comportamiento mecánico del envase (Awja & Pavel, 2005; Viora et al., 2023; Wawrzyniak et al., 2024). Igualmente se ha reportado que este material presenta una ligera tonalidad amarillenta o grisácea, puede hacerse visible cuando en envases está vacío o se observa a contraluz (plástico.com, 2025).

Este estudio se crea a partir de una necesidad tangible de una empresa ubicada en Soacha, Cundinamarca, que busca utilizar e incorporar en sus productos el PET posconsumo para la fabricación de shampoo de 100 ml, estos envases se fabrican mediante un proceso de inyección-soplado, lo cual primero se fabrica la preforma por medio del método de inyección del plástico e inmediatamente se le da la forma de la botella mediante unas cavidades y se aplica con el método de soplado con la alta presión de aire, pero antes de implementar este cambio en la producción, es necesario responder una sencilla pregunta: ¿una mezcla con un 30% de PCR permite fabricar envases que mantengan la estabilidad del proceso, cumplan con las especificaciones dimensionales, conserven una buena apariencia y sea funcional durante el proceso de etiquetado semi automático?. Aunque existen estudios sobre el uso del PET reciclado, esta respuesta solo se puede obtener evaluando la mezcla en las condiciones reales de una producción industrial real.

Actualmente existe disponibilidad del PET reciclado en nuestro país, hay normas que promueven su aprovechamiento y también interés por parte de la industria en aumentar su uso.

Sin embargo, no se cuenta con información que demuestre cómo se comporta esta mezcla (70 % virgen+30% PCR) en un envase con estas características, Por esta razón en lugar de asumir que el cambio es factible, esta investigación busca comprobarlo mediante una fabricación de un lote piloto de 3.000 unidades de envase. Para esto se realizaron mediciones dimensionales, inspecciones visuales y una evaluación del desempeño del envase durante el proceso de etiquetado envolvente.

3. Identificación de variables técnicas y contextuales

En este estudio se tuvo en cuenta diferentes variables que ayudan a evaluar el comportamiento y el proceso. Hay algunas que están relacionadas con el aspecto técnico, como las propiedades del PET, las condiciones de fabricación y las características del envase final. Otras corresponden a factores externos como la normatividad vigente, la disponibilidad del material reciclado y la capacidad de la empresa para mantener este tipo de producción. Con la siguiente tabla se presenta las variables a considerar.

Cada una de estas variables se analiza de manera individual, todas tienen relación entre sí. La calidad del PET reciclado, la humedad y el secado del material y las condiciones del proceso pueden afectar el resultado final del envase. De la misma forma para que esta alternativa puede mantenerse en el tiempo y sea replicable, es importante contar con un suministro constante del material, contar con la normatividad actual y garantizar la trazabilidad y disponer las condiciones necesarias dentro de la empresa para implementar este cambio en producciones futuras.

Variable	Tipo	Descripción	Papel en el problema
Porcentaje de PET reciclado	Técnica	Proporción de PCR en la mezcla.	Define la formulación base y puede cambiar el desempeño del material.

Variable	Tipo	Descripción	Papel en el problema
Viscosidad intrínseca	Técnica	Indicador del peso molecular del PET mezclado.	Influye en el estirado, la estabilidad del fundido y la resistencia del envase.
Humedad del material	Técnica	Contenido de humedad previo al moldeo.	Una humedad inadecuada degrada el PET por hidrólisis y genera defectos.
Temperatura, presión y enfriamiento	Técnica	Parámetros operativos del equipo de inyección-soplado.	Condicionan la formación del envase y la repetibilidad del proceso.
Calidad dimensional	Técnica	Cumplimiento de peso, altura, diámetro y geometrías críticas.	Permite verificar si el envase cumple las especificaciones definidas.
Calidad visual y funcional	Técnica	Apariencia, transparencia, ausencia de defectos y desempeño en uso.	Determina la aceptación técnica y comercial del producto.
Compatibilidad con etiqueta envolvente	Técnica	Respuesta del envase frente al etiquetado en línea.	Mide si la mezcla afecta la etapa de acondicionamiento final.
Exigencias regulatorias y ambientales	Contextual	Normas y políticas sobre economía circular, envases y cosméticos.	Presionan la incorporación de reciclado y delimitan criterios de cumplimiento.
Disponibilidad y trazabilidad del rPET	Contextual	Constancia del suministro y claridad sobre el origen del material.	Afecta la repetibilidad industrial y la confiabilidad del proceso.
Requisitos del sector cosmético	Contextual	Demandas de calidad, apariencia y compatibilidad envase–producto.	Elevan el nivel de exigencia frente a otros usos del PET.
Capacidad organizacional	Contextual	Coordinación entre producción, calidad, compras y asuntos regulatorios.	Incide en la implementación y validación del cambio material.

Fuente: elaboración propia

4. Delimitación del problema

La presente investigación se delimita al análisis de la viabilidad técnica del uso de PET reciclado posconsumo (PCR) en la fabricación de envases cosméticos de 100 ml mediante el proceso de

inyección-soplado. El estudio se desarrollará en una empresa del sector plástico ubicada en Soacha-Cundinamarca, Colombia, durante el período comprendido entre enero y mayo de 2026. La investigación tendrá un enfoque aplicado y experimental, enfocado en evaluar propiedades físicas, estabilidad dimensional y calidad visual del envase obtenido. No se incluirán análisis financieros, comerciales ni estudios relacionados con percepción del cliente.

5. Pregunta de investigación

¿Es viable, desde el punto de vista técnico, fabricar mediante inyección-soplado envases de shampoo de 100 ml con una mezcla de 30 % de PET reciclado posconsumo y 70 % de PET virgen, de manera que cumplan los requisitos dimensionales, visuales, funcionales, etiquetado envolvente y de proceso definidos para su aplicación?

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Determinar la viabilidad técnica de fabricar, mediante inyección-soplado, envases cosméticos de shampoo de 100 ml con una mezcla de 30 % de PET reciclado posconsumo y 70 % de PET virgen, a partir del análisis del comportamiento del material, las condiciones de proceso y el cumplimiento de los requisitos dimensionales, visuales, funcionales y etiquetado envolvente.

6.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de las condiciones de proceso (temperatura, presión de soplado y enfriamiento) sobre la estabilidad operativa de la fabricación piloto del envase de 100 ml.
- Verificar el cumplimiento de las especificaciones dimensionales, visuales y funcionales del envase obtenido, mediante mediciones instrumentales, inspección visual y pruebas funcionales.

- Analizar la compatibilidad del envase fabricado con la operación de etiqueta envolvente y determinar, con base en la evidencia experimental, si la formulación propuesta constituye una alternativa industrial viable.

7. Justificación

La investigación se justifica en una necesidad ambiental concreta. La política pública colombiana sobre economía circular y la regulación relacionada con envases y empaques exigen avances verificables en la reincorporación de materiales reciclables (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018, 2019).

Existe también una justificación técnica importante en materiales como el PET, la mezcla de reciclado puede modificar variables como la viscosidad intrínseca, la estabilidad térmica y la respuesta mecánica del envase final (Awaja & Pavel, 2005; Viora et al., 2023; Wawrzyniak et al., 2024). Por esta razón, antes de utilizar este material para una producción industrial a mayor escala, es importante comprobar que una mezcla específica mantiene el desempeño esperado durante el proceso de inyección-soplado, Es importante recalcar cuando los envases se utilizan en productos cosméticos, donde la apariencia y la uniformidad son aspectos fundamentales para el consumidor final ya que da la impresión de ser un producto de alta calidad.

Adicional, este estudio no busca únicamente demostrar que el PET reciclado puede utilizarse en la fabricación de envases, su propósito es identificar las condiciones ideales en las que se puede incorporar sin afectar su funcionalidad, calidad y estética.

Estos resultados pueden servir como punto de referencia para futuras investigaciones que evalúen porcentajes más altos de material reciclado e inclusive utilizando el 100% de PCR o en otros tipos de envases para productos cometidos

8. Antecedentes investigativos

Como parte de esta investigación, se tuvieron en cuenta diferentes estudios relacionados con el PET reciclado. Para entender su análisis, los antecedentes se agruparon en tres temas:

1. Comportamiento del material en proceso de inyección-soplado
2. Aplicación en envases en la industria para el sector cosmético
3. Investigaciones desarrolladas en Colombia

8.1 Estudios sobre el comportamiento técnico del rPET en inyección-soplado

Awaja y Pavel (2005) Mezclas vPET/rPET en injection stretch blow moulding

Estos autores evaluaron mezclas con PET virgen y PET reciclado en el proceso de *injection blow moulding* para la fabricación de botellas. En el estudio se realizaron análisis en diferentes porcentajes de material reciclado y evaluaron diferentes variables como la resistencia a la presión interna, la permeabilidad y la estabilidad del proceso. Los resultados finales dieron como resultado que tanto la cantidad de material PCR incorporada como la viscosidad intrínseca de la mezcla influyen directamente en el comportamiento del envase.

Para esta investigación, el trabajo es un referente importante porque se demuestra la viscosidad intrínseca es una variable importante y que se debe evaluar antes y después del procesamiento para analizar y comprender como cambia el material.

Viora et al. (2023) Comparación fisicoquímica entre PET virgen y rPET

Viora y su equipo compararon el PET virgen con el PET reciclado para conocer las diferencias entre ambos materiales. Se realizaron análisis térmicos, estudios de cristalización y ensayos mecánicos, Aunque encontraron que el PCR conserva propiedades muy similares a las del PET virgen, se observaron diferencias durante del proceso de transformación, especialmente en la forma en que se cristaliza el material. El trabajo es importante para la presente investigación porque demuestra que no basta en comparar las propiedades iniciales de los materiales

involucrados, sino que también es importante evaluar el comportamiento durante el proceso de fabricación del envase.

Wawrzyniak et al. (2024) — Efecto del contenido de rPET y de las condiciones térmicas de la preforma.

Wawrzyniak y su equipo realizaron el análisis sobre como influyen los porcentajes de PET reciclado posconsumo (PCR) y las condiciones de calentamiento y enfriamiento de la preforma durante el proceso de *stretch blow molding*.

Para ello utilizaron una metodología de superficie de respuesta, análisis ANOVA y caracterización por aniquilación de positrones (PAS) la cual es una técnica que permite estudiar la estructura atómica, la densidad electrónica y los defectos a escala nanométrica en materiales sólidos, con el fin de evaluar cambios como la micro cavitación y la post condensación en estado sólido. Los resultados mostraron que tanto la cantidad de material PCR como las condiciones térmicas modifican la estructura del material afectando su comportamiento mecánico.

Este trabajo sirve como referencia para la presente investigación ya que respalda la necesidad de realizar un diseño de experimento (DOE) que permitirá identificar las condiciones de proceso óptimas para llevar un proceso a una prueba de mayor escala.

Alvarado Chacon et al. (2020) — Efecto del contenido reciclado y la calidad del PCR sobre las botellas PET

El caso de este estudio se evaluó preformas previamente fabricadas con diferentes porcentajes y calidades de PET reciclado posconsumo (PCR), identificadas como tipos A,B y C. las Preformas se fabricaron en una maquina inyectora de 50 toneladas y posteriormente se transformaron en envases mediante un equipo semi automático de soplado. Durante el proceso de definieron condiciones de operación como una presión de inyección de 555 bares, un tiempo de ciclo de soplado de 33 segundos y un secado previo del material de 16 grados centígrados

durante seis horas. Adicional los autores encontraron diferencias en la apariencia y en las propiedades mecánicas entre los distintos lotes fabricados, lo que demuestra que la calidad del PET reciclado suministrado por el proveedor influye directamente en el resultado final

Estos datos son de gran utilidad para esta investigación por lo que permite tomar como ejemplo las condiciones iniciales de secado y parámetros de inyección durante la etapa de acondicionamiento del proceso.

8.2 Estudios sobre PCR aplicado a empaque cosmético

Gatt y Refalo (2022) — Reutilización y reciclabilidad de empaques cosméticos plásticos

Los autores aplicaron análisis de ciclo de vida (ACV) a distintas configuraciones de empaque cosmético plástico, incluyendo botellas PET. Aunque su enfoque fue ambiental más que de proceso, llegaron a una conclusión relevante: las decisiones de diseño del empaque deben equilibrar sostenibilidad, robustez y reciclabilidad. Este planteamiento orienta el presente trabajo hacia un criterio integrado de viabilidad: no basta con que el envase sea fabricable, también debe sostenerse en términos de desempeño y de circularidad.

Caso ITC Packaging (España) — Incorporación de rPET hasta 100 %

Este caso industrial documentado por ITC Packaging muestra que envases cosméticos por inyección-soplado pueden producirse con PCR en distintas gradaciones, llegando incluso al 100 %. El operador reporta que las propiedades mecánicas se mantienen comparables a las del polímero virgen y que la transparencia se conserva con una ligera tonalidad dependiente del porcentaje incorporado. La experiencia industrial respalda la hipótesis de que un 30 % de rPET es perfectamente viable, pero también deja una alerta: la tonalidad del envase puede verse afectada y debe vigilarse como criterio visual.

Caso Ho.Bag y SIPA (Italia) — Líneas dedicadas a rPET para cosmética

Ho.Bag, fabricante italiano dedicado a envases cosméticos, adoptó máquinas de inyección-soplado mono etapa de SIPA capaces de procesar mezclas con PCR y resinas

vírgenes. La elección obedeció a la necesidad de operar con una cadena certificada y trazable de material reciclado, manteniendo la flexibilidad de producir envases pequeños con geometrías variadas. El caso muestra que la viabilidad industrial del PCR en cosmética no depende solo del material, sino también del equipo y del diseño de la operación. Para el presente estudio, este antecedente refuerza la importancia de registrar los parámetros de máquina con detalle durante la prueba piloto.

8.3 Investigaciones desarrolladas en el contexto colombiano

Zapata Bravo et al. (2021) — Economía circular de las botellas PET en Colombia

Este estudio, publicado en *Cuadernos de Administración* analizó la economía circular de las botellas en material PET en Colombia y describió como participan los diferentes actores de reciclaje. Los autores hacen énfasis en los avances en la normatividad como la Resolución 1407 de 2018 y identificaron los actores principales y así como las dificultades que existen para mejorar el aprovechamiento del material. Para esta investigación el trabajo es una referencia importante porque muestra en el nuestro país Colombia ya existen avances en el uso y la recuperación del PET reciclado.

También se señala la necesidad de realizar más estudios en condiciones reales de producción, en conclusión, la investigación presentada busca aportar evidencia a partir de un caso práctico de desarrollo en una planta de fabricación de envases.

Reportes sectoriales — Superintendencia de Servicios Públicos (2023)

Aunque estos informes no corresponden a investigaciones académicas, la información publicada por la Superintendencia permite conocer como ha avanzado el aprovechamiento del PET en Colombia. Según el Reporte del año 2023, se recuperaron 283.531 toneladas de este material, lo que representa el 30.32% del total aprovechado en todo el país.

Según estas cifras muestras que existe una oferta importante de PET reciclado para suministrar y abastecer procesos industriales como el evaluado en esta investigación.

Pero todavía es necesario comprobar mediante estudios específicos que este material cumple los requisitos técnicos para cada aplicación.

9. Marco institucional

Esta investigación tiene en cuenta las normas que regulan la fabricación de los envases para productos cosméticos y el uso de materiales reciclados.

En la Region Andina los productos cosméticos se rigen por la decisión 516 de la comunidad andina y en Colombia el INVIMA es la entidad encargada de vigilar su cumplimiento.

Por esta razón, cualquier cambio que se llegue a realizar en el envase debe demostrar que sigue cumpliendo los requisitos técnicos y la normativa vigente.

En cuanto al aspecto ambiental, en Colombia ha impulsado el uso de materiales reciclados mediante la estrategia nacional de economía circular y la resolución 1407 de 2018, que promueve una mejor gestión de los residuos de envases y empaques (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018-2029), sin embargo para una propuesta como esta pueda aplicarse en una empresa no basta con que funcione en una prueba piloto, es necesario que las áreas de producción, calidad, abastecimiento asuntos regulatorios y gestión ambiental trabajen de manera coordinada para garantizar que el cambio pueda mantenerse en el tiempo y que cumpla con todos los requisitos exigidos.

10. Marco teórico

El PET reciclado posconsumo (rPET o PET-PCR), corresponde al material del resultado de los envases en PET virgen que después de ser utilizados, se recuperan, se clasifican y se procesan para volver a ser utilizados como resina o pelets.

Su principal ventaja es que permite reemplazar parte del PET virgen y favorece el aprovechamiento de los residuos dentro del un modelo de economía circular pero antes de ser utilizado es importante recalcar que es un material que ya ha pasado por diferentes procesos de

uso y reciclaje, lo cual modifica sus propiedades como la viscosidad intrínseca y su comportamiento durante el proceso de transformación. (Awaja & Pavel, 2005; Viora et al., 2023).

La viabilidad técnica en este trabajo hace referencia a la capacidad de fabricar un envase con una mezcla de materiales sin afectar la estabilidad del proceso ni la calidad del producto final. No basta con que el material pueda procesarse en la máquina, también es importante que los envases cumplan las especificaciones definidas para su uso.

Un envase de material PET para productos cosméticos debe cumplir requisitos de apariencia, dimensiones y funcionalidad, debe presentar un buen acabado, sin defectos visible, respetar las medidas establecidas y ofrecer resistencia necesaria para el llenado, el transporte y el almacenamiento. Adicional debe ser compatible con los procesos posteriores como la puesta de la etiqueta.

La economía circular busca aprovechar los materiales durante el mayor tiempo posible y reducir la generación de residuos. En los envases PET eso significa recuperar el material, procesarlo nuevamente y reincorporarlo a nuevos productos, para que este proceso sea realmente viable no basta con que el material pueda reciclarse, es necesario contar con sistemas de recuperación eficientes y comprobar que el PET reciclado mantiene el desempeño requerido para cada aplicación.

10.1 Polietileno tereftalato (PET): estructura y propiedades de procesamiento

El Material PET se fabrica a partir de etilenglicol y ácido Tereftálico, gracias a la forma en que este compuesto, este material tiene una excelente resistencia mecánica, es cristalino y ofrece una buena barrera frente a los gases.

Por estas características se ha convertido en uno de los materiales más utilizados para fabricar envases de bebidas y en los últimos años, también para envases de productos cosméticos.

Una de las características más importantes del material PET es que absorbe fácilmente la humedad del ambiente. Si el material no se pre seca correctamente antes de procesarlo, el

agua afecta su estructura cuando se expone a altas temperaturas, esto hace que disminuya la viscosidad intrínseca, reduzca su resistencia y pueden aparecer defectos en los envases como burbujas, manchas o pérdida de transparencia. Por esta razón antes de iniciar el proceso se recomienda secar el PET hasta alcanzar un contenido de humedad inferior a 50 ppm (0,005%), utilizando secadores con desecante entre 160 y 180 grados centígrados durante cuatro a seis horas (Plastics technology, 2018; FECISION, 2025; TLD Vietman, 2026).

También es importante controlar la temperatura durante el proceso en máquina, Si es muy baja la temperatura el material se vuelve más viscoso y no llena correctamente la preforma en el molde de inyección, si es muy alta la temperatura el material PET se comienza a degradar y a quemar. Por eso, durante la fabricación es necesario mantener condiciones de operación estables y ajustar adecuadamente las variables del proceso, tal como se plantea en esta investigación,

10.2 PET reciclado posconsumo (rPET o PET-PCR)

El rPET o PET-PCR es el resultado de la fabricación de los envases PET con resina virgen que ya fueron utilizados y que después de ser recolectados pasan procesos de clasificación, lavado, descontaminación y reciclaje.

Al finalizar este proceso el material vuelve a convertirse en resina o pellets y se vuelve a utilizar para fabricar nuevamente envases u otros productos. Este proceso permite reemplazar parte del PET virgen y aprovechar este material para que no termine como residuo y así contribuyendo a la economía circular (Awaja & Pavel, 2005; Viora et al., 2023).

El rPET no tiene un comportamiento igual al PET virgen, ya que este ya paso por un ciclo de uso y por un nuevo proceso de transformación algunas de sus propiedades cambian. Una de las más importantes es la viscosidad intrínseca, que normalmente disminuye. Por ejemplo, una resina con IV de 0,8 dL/g puede bajar hasta 0,75 dL/g o incluso menos después del reciclaje. También es común que el material presente una ligera tonalidad amarillenta o grisácea, también se presentan pequeñas cantidades de contaminantes (puntos negros) que pueden afectar la

apariencia e inclusive el olor del envase (Plastico.com, 2025). Para recuperar parte de estas propiedades, las empresas recicladoras utilizan un proceso llamado policondensación en estado sólido (SSP), la cual ayuda a aumentar nuevamente el peso molecular del material y permite emplearlo en aplicaciones que requieren mayores niveles de desempeño, como la fabricación de botellas y envases para cosméticos.

En los últimos años también se ha fortalecido los requisitos para garantizar la calidad del rPET. En el año 2024 la autoridad europea de seguridad alimentaria (EFSA) estableció que los procesos de reciclaje mecánico del PER deben demostrar, mediante pruebas de desafío que el material puede descontaminarse de forma adecuada cuando se destina al contacto con alimentos.

Aunque esta investigación está enfocada en envases cosméticos, este criterio sirve como una referencia importante ya que demuestra la necesidad de contar con un rPET de buena calidad, con procesos de reciclaje que garanticen un material seguro y confiable para las nuevas aplicaciones.

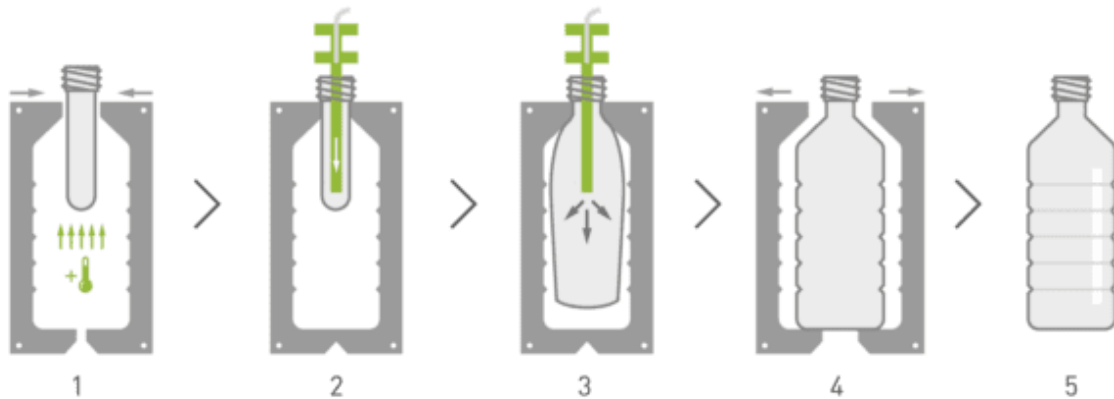
10.3 Inyección-soplado (ISBM): fundamentos del proceso

EL inyector soplado, conocido para el PET como Injection stretch blow moulding (ISMB) es una de las tecnologías más utilizadas para fabricar este tipo de envases. El proceso se realiza en dos etapas. Primero se inyecta la preforma con la cantidad necesaria de material, después la preforma se calienta y se introduce en un molde en el molde de soplado (con la forma final del envase) donde se estira la preforma con una varilla de estirado y se expande mediante aire a alta presión hasta obtener la forma final del envase.

La rosca y el cuello quedan completamente formados desde la etapa de inyección, mientras el cuerpo y el fondo del envase se obtienen durante el proceso de soplado (Plastico, 2023).

Figura 01 obtenida página internet:

<https://nurel.com/division-biopolimeros/procesos/inyeccion-soplado>



La calidad del envase depende de que varias condiciones del proceso mantengan con un proceso estable y bajo control. Entre ellas están las temperaturas del material, la distribución del PET en la preforma, la humedad residual, la presión de soplado y el sistema de enfriamiento del molde de inyección y soplado.

Cuando alguna de estas variables no se tiene en cuenta o no se controlan correctamente, aparecen como espesores desiguales, deformaciones, pérdidas de transparencia, micro cavitaciones o una menor resistencia mecánica del envase

Wawrzyniak et al. (2024) documentaron que tanto la composición vPET–rPET como las condiciones térmicas de la preforma alteran la estructura interna del material, en especial la cristalinidad y el volumen libre amorfo. Por eso, en este trabajo, las condiciones de proceso se consideran variables a ajustar antes del piloto ampliado y no como datos fijos.

10.4 Viabilidad técnica industrial

En esta investigación, la viabilidad técnica se entiende como la posibilidad real de transformar una mezcla polimérica específica en un envase funcional, bajo condiciones estables de proceso y con resultados repetibles. No basta con que el material pueda ingresar a la máquina: además, debe permitir obtener unidades que cumplan las especificaciones definidas para su uso.

Desde esa perspectiva, la viabilidad integra tres dimensiones: la transformabilidad del material, la estabilidad operativa del proceso y la conformidad del envase terminado.

Esta definición operacional difiere del uso coloquial del término viabilidad porque exige criterios verificables. En el presente estudio, la viabilidad técnica se considerará alcanzada solo cuando se cumplan, de manera simultánea y consistente, condiciones específicas relacionadas con la mezcla, las dimensiones, la apariencia y la compatibilidad con la operación de etiquetado. Si una sola de esas condiciones no se sostiene, la formulación no se considera viable.

10.5 Calidad del envase cosmético

Un envase cosmético de PET debe cumplir exigencias visuales, dimensionales y funcionales. En lo visual, se espera uniformidad, ausencia de defectos notorios, transparencia y estabilidad del color. En lo dimensional, debe respetar tolerancias de altura, diámetro, peso y geometrías críticas para el cierre, el llenado y el transporte. En lo funcional, debe conservar estabilidad mecánica, ofrecer resistencia suficiente para la manipulación y ser compatible con operaciones complementarias como el etiquetado envolvente.

La especificidad cosmética eleva el estándar respecto de otros usos del PET. Una botella de bebida tolera una ligera variación de color porque el contenido lo enmascara; un envase cosmético, en cambio, suele estar a la vista del consumidor en un anaquel y cualquier diferencia visual se nota de inmediato. Esta sensibilidad explica por qué el porcentaje de incorporación de rPET en cosmética suele ser más conservador que en bebidas y por qué el control de la tonalidad y de los defectos visuales tiene un peso especial dentro del criterio de aceptación.

10.6 Economía circular aplicada al envase plástico

La economía circular es un modelo orientado a mantener el valor de los materiales dentro del sistema productivo durante el mayor tiempo posible. Aplicada al envase plástico, implica diseñar, seleccionar y transformar materiales de manera que puedan reincorporarse a nuevos

ciclos de uso. En el caso del PET, la circularidad no depende únicamente de su reciclabilidad teórica, sino también de la existencia de cadenas de recuperación, de capacidad técnica para reincorporarlo sin afectar el desempeño del producto y de regulación que sostenga la demanda.

La Unión Europea, mediante el Reglamento de Envases y Residuos de Envases (PPWR) y el Plan de Acción de Economía Circular, estableció que para 2030 todos los envases plásticos vendidos en su mercado deberán contener al menos 30 % de material reciclado. Este referente internacional explica por qué la industria cosmética global ya está moviendo sus estándares hacia ese umbral y por qué el caso colombiano con su política de economía circular— se alinea con esa tendencia. La presente investigación se sitúa precisamente en ese punto: validar técnicamente, en una aplicación local, una proporción que ya es referente internacional.

11. Diseño metodológico

11.1 Enfoque y tipo de estudio

La investigación se plantea desde un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con alcance descriptivo-evaluativo, ya que busca generar evidencia técnica sobre el comportamiento de una formulación específica de PET reciclado en una aplicación industrial concreta. El diseño es experimental a nivel piloto, pues se observará el desempeño de una mezcla definida bajo condiciones controladas de transformación.

La unidad de análisis está conformada por envases de shampoo de 100 ml fabricados mediante inyección-soplado con una mezcla de 30 % de PET reciclado posconsumo y 70 % de PET virgen. La variable independiente corresponde a la formulación del material. Como variables dependientes se consideran el comportamiento del material durante el proceso, la calidad visual del envase, el cumplimiento dimensional y la funcionalidad del envase.

Para recolectar la información se utilizarán inspección visual, mediciones dimensionales, verificación funcional del envase y registro de incidencias durante la operación. Los instrumentos incluirán formatos de inspección, registros de parámetros de máquina y formatos

de evaluación del lote piloto. El análisis se realizará mediante comparación entre los resultados obtenidos, las especificaciones definidas para el envase y el criterio de estabilidad operativa del proceso.

La investigación practica se desarrollará en cuatro etapas:

- La primera corresponde a la preparación y acondicionamiento del material, incluida la mezcla y el secado previo.
- La segunda consiste en la fabricación de un lote inicial de 100 envases en equipo AOKI, con el fin de identificar el comportamiento preliminar de la formulación.
- La tercera se orienta al ajuste de parámetros de proceso a partir de los hallazgos de la prueba inicial.
- La cuarta contempla una prueba piloto de 3.000 envases para verificar estabilidad operativa, cumplimiento técnico y compatibilidad con el etiquetado envolvente.

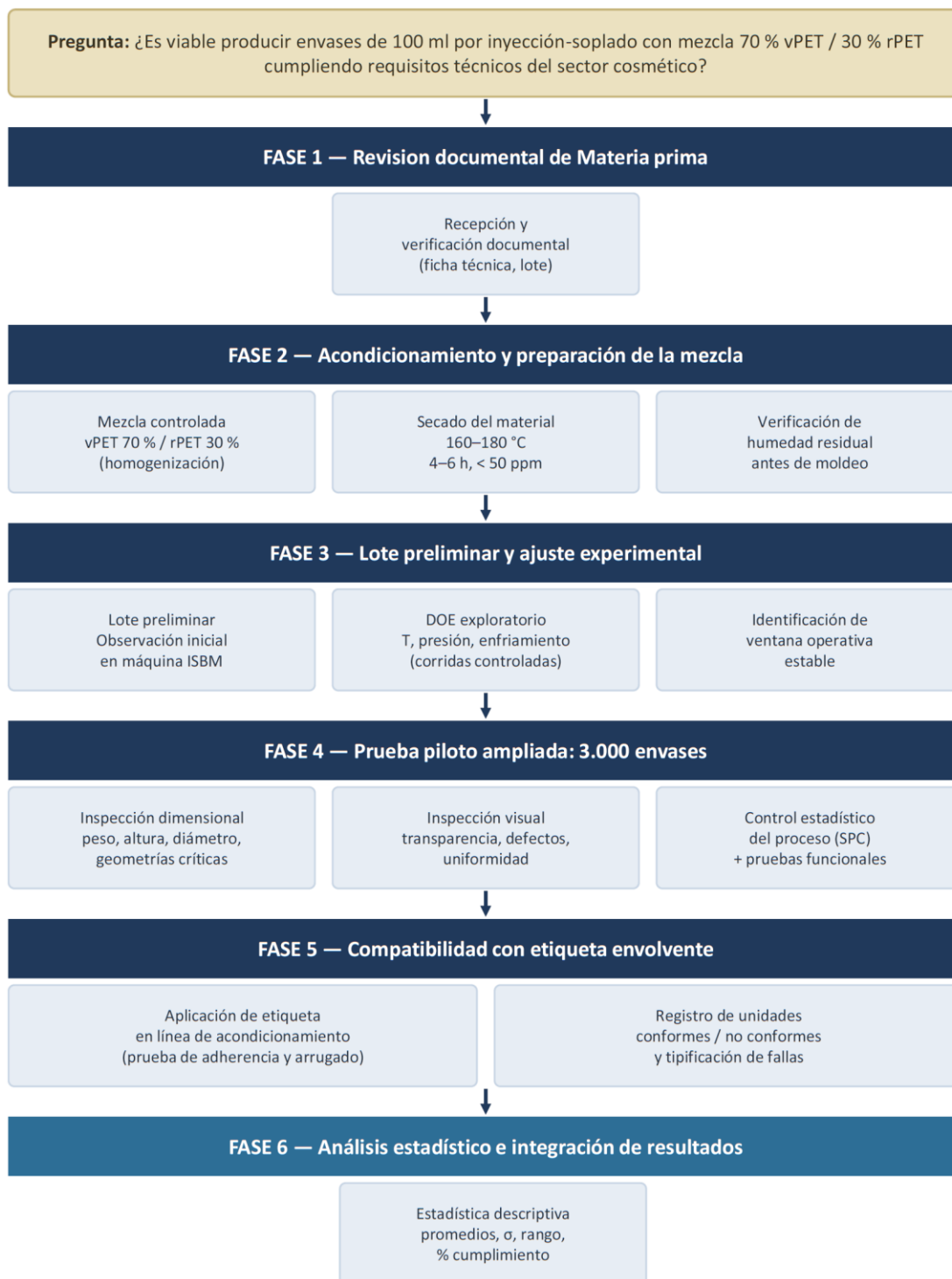
El criterio de viabilidad técnica se establecerá a partir del cumplimiento simultáneo de cuatro condiciones: que la mezcla pueda procesarse con estabilidad, que el envase cumpla las especificaciones definidas, que el etiquetado envolvente cumpla y que no se presenten desviaciones críticas que impidan su uso previsto.

11.2 Esquema general del diseño metodológico

La figura siguiente sintetiza, en seis fases, el flujo metodológico que se aplicará desde la recepción del material hasta la integración final de los resultados. Cada fase está asociada con uno o varios objetivos específicos del estudio, lo que permite trazabilidad entre lo que se busca probar y la actividad que produce la evidencia correspondiente.

Figura 1. Esquema general del diseño metodológico

Diseño metodológico — Viabilidad técnica del rPET en envases cosméticos



Fuente: Elaboración propia, 2026

11.3 Técnicas de recolección de datos

Para responder al problema se emplean técnicas propias de los estudios cuantitativos en ingeniería de procesos. Las mediciones instrumentales sirven para caracterizar el material y verificar el desempeño del envase; el registro estructurado de parámetros de proceso documenta las condiciones operativas y las incidencias durante la fabricación; y la prueba piloto bajo condiciones controladas permite observar la estabilidad de la transformación y el cumplimiento de las especificaciones.

De manera complementaria se incorpora un ajuste experimental de parámetros mediante un esquema exploratorio de diseño de experimentos (DOE) de baja complejidad. El objetivo es identificar combinaciones operativas viables de temperatura, presión de soplado y enfriamiento. Durante la prueba piloto ampliada se aplican criterios de control estadístico de proceso (SPC) sobre variables críticas seleccionadas para verificar consistencia y repetibilidad.

11.4 Instrumentos de recolección

Los instrumentos seleccionados deben asegurar trazabilidad de la medición, claridad de los criterios de aceptación y compatibilidad con los recursos disponibles en planta. El conjunto incluye:

- Ficha técnica del material y certificado del proveedor para PET virgen y para rPET, con indicación de viscosidad intrínseca nominal, lote y color.
- Analizador de humedad para la determinación de humedad antes del moldeo
- Formato de registro de parámetros de máquina, con captura por corrida de temperatura, presión de soplado, tiempos de ciclo y condiciones de enfriamiento.
- Formato de inspección visual estructurado por tipo de defecto (Puntos negros, Distribución irregular del espesor, marcas de proceso menores y estabilidad del envase).

- Formato de medición dimensional con peso, capacidad volumétrica, altura total, altura de cuello, diámetro interno de boca, diámetro menor y mayor de rosca, diámetro mayor de cuerpo y espesor mínimo de pared.
- Lista de chequeo funcional para estabilidad, Aplicación de torque, hermeticidad en campana de vacío y caída libre a 120 cm.
- Formato de evaluación de compatibilidad con etiqueta envolvente (adherencia, presencia de arrugas, posicionamiento).

Los instrumentos dimensionales se aplican con balanza, calibrador (pie de rey), calibrador de alturas, medidor de espesores, torquímetro y campana de vacío.

Las muestras se tomarán al inicio, mitad y final de la prueba piloto, garantizando un total de 75 muestras.

11.5 Procedimiento

El procedimiento se desarrolla en seis etapas alineadas con las fases del esquema metodológico (Figura 1).

La primera fase consiste en la recepción y verificación documental del PET virgen y del rPET, incluyendo identificación de lote, trazabilidad y revisión de especificaciones del proveedor.

En la segunda se realiza el acondicionamiento del material mediante mezcla controlada en proporción 70/30 y secado previo según la ventana definida para el PET (160–180 °C, entre cuatro y seis horas, hasta una humedad residual inferior a 50 ppm).

La tercera fase aborda la caracterización inicial del material, con medición de humedad.

La cuarta fase involucra la fabricación de un lote preliminar en el equipo de inyección-soplado para observar el comportamiento inicial de la formulación. Aquí se registran de forma sistemática los parámetros de operación, las incidencias, los ajustes realizados y los defectos observados.

En la quinta se realiza el ajuste experimental de variables críticas mediante corridas controladas, priorizando temperatura de calentamiento, presión de soplado y condición de enfriamiento, hasta identificar una ventana operativa estable.

Finalmente, la sexta fase corresponde a la prueba piloto ampliada con 3.000 envases, dirigida a verificar repetibilidad, cumplimiento técnico y compatibilidad con la etiqueta envolvente.

En el desarrollo participan personal de producción, calidad e ingeniería. Producción opera el equipo y ejecuta los ajustes autorizados; calidad realiza muestreo, inspección y consolidación de datos; el responsable del proyecto integra resultados, verifica consistencia metodológica y emite el análisis final.

11.6 Plan de análisis

El análisis se desarrolla aplicando estadística descriptiva a las variables medidas, mediante promedios, desviación estándar, control estadístico de proceso y porcentaje de cumplimiento frente a especificación.

Para el componente de estabilidad operativa se revisan los registros de incidencias, la frecuencia de defectos y la consistencia del proceso entre corridas. Para la compatibilidad con etiqueta envolvente se analiza el porcentaje de unidades conformes.

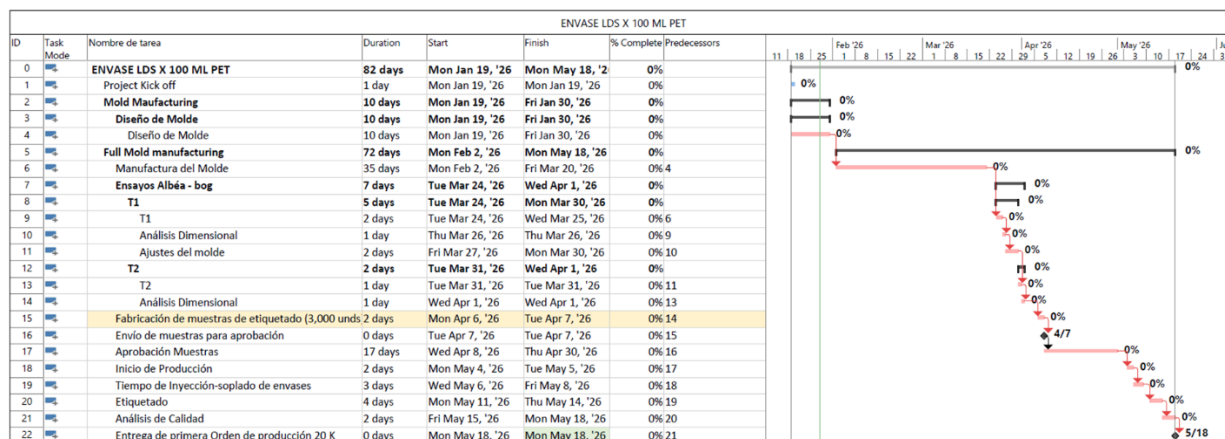
11.7 Criterio de viabilidad técnica

Se concluye que la formulación es técnicamente viable cuando se cumplen, de manera simultánea, cuatro condiciones:

- La mezcla 30 % rPET y 70 % PET virgen se procesa con estabilidad operativa durante la prueba piloto.
- El envase cumple los requisitos dimensionales y de peso definidos por la especificación.
- Presenta conformidad visual y funcional para el uso previsto en producto cosmético.
- No genera incompatibilidades críticas en la aplicación de la etiqueta envolvente.

Si una o varias de estas condiciones no se sostienen de forma consistente, la formulación no se considerará viable en los términos del presente estudio.

11.8 Cronograma



Fuente: elaboración propia

12. Resultados de la investigación

Esta sección presenta los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita. Los datos provienen del piloto metodológico, del DOE exploratorio y de la prueba piloto ampliada con 3.000 envases.

12.1 Caracterización del material de entrada

La caracterización inicial mostró que el PET virgen entregado por el proveedor presentó una viscosidad intrínseca declarada de 0,80 dL/g, mientras que el rPET posconsumo, reportó una viscosidad intrínseca de 0,76 dL/g. La mezcla 70/30, calculada por regla aditiva, queda en torno a 0,79 dL/g, valor que se ubica dentro del rango operativo recomendado para la fabricación de preformas y envases cosméticos por inyección-soplado.

La medición de humedad del material seco antes del moldeo arrojó valores entre 32 y 41 ppm para el PET virgen y entre 38 y 49 ppm para el rPET. Estos valores cumplen con el criterio

de menos de 50 ppm establecido en la literatura técnica como umbral seguro para evitar la degradación hidrolítica durante el procesamiento (Plastics Technology, 2018; FECISION, 2025). En consecuencia, el material entró al ciclo de inyección con una condición compatible con la ventana de proceso definida.

La inspección visual del rPET en escama evidenció una tonalidad amarillenta leve, esperable para un material de origen posconsumo. No se detectaron contaminantes visibles ni partículas extrañas que sugirieran problemas en la cadena de suministro.

12.2 Ajuste de las condiciones de proceso

Se realizaron corridas controladas que variaron tres factores: temperatura de calentamiento de la preforma, presión de soplado y tiempo de enfriamiento. Tras tres corridas con réplica, se identificó una ventana operativa estable centrada en una temperatura de calentamiento de 105 ± 2 °C en la zona crítica de la preforma, una presión de soplado de 28 bar y un tiempo de enfriamiento de 3,2 segundos. Bajo estas condiciones, el envase resultó dimensionalmente conforme y sin defectos visibles relevantes.

Figura 2. Protocolo de parámetros de maquina

Producto	Cilindrico L. 2.5 x 100			Fecha	2026 04 22		
Materia Prima	70% PGT 30% PCL			Máq. No.	21		
Molde Refer				Dosificador			
Color	Amarillo			Pigmento			

PARÁMETROS DE MÁQUINA								
Ciclo	16.70 s	Presión Primaria	SV	SV	ST	SM		
Diám. Tornillo	Ømm		35			50		
Diám. Punta	Ømm		90	90	90	V		
Rpm Tornillo	110 RPM		95	70	13.7	P		
			3.70					
PRESIÓN INYECCIÓN								
Primera Presión	7.0 Kg/cm²							
Segunda Presión	10.5 Kg/cm²							
Veloc. Inyección	0.40							
Contra-Presión	05 Kg/cm²							
DOSIFICACIÓN								
UNIDAD	100	INYECCIÓN	13.7					
TEMPERATURA CAÑÓN °C								
	Programada	Real						
Frontal	270	270						
Media	270	270						
Atrás	270	270						
Nariz	270	270						
Vent Frontal								
Vent Media								
Vent Atrás								
TEMP. COLADA CALIENTE (H.R.) °C								
	Programada	Real						
Bebadero A	270	270						
Bloque A1	275	275						
A2	275	275						
Puntas A1	310	310						
A2	310	310						
A3	300	300						
A4	300	300						
A5	310	310						
A6								
A7								
A8								
A9								
A10								
A11								
A12								

MOLDE SUPERIOR		MOLDE INFERIOR	
SQ 15		SQ 26	
SQ 16		SQ 36	
SQ 41		SQ 28	
SQ 17		SQ 27	

AGUA CHILLER		Temperatura (°C)		Presión (Psi)		Caudal (Lt/min)
IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	IN
Cavidades						
Machos						

LISTADO DE TIEMPOS															
#	s	#	s	#	s	#	s	#	s	#	s	#	s	#	s
0	800	22	10	44		66		88		110		132	100	154	177
1	500	23	300	45		67		89		111		133	9000	155	178
2	10	24	150	46		68		90		112		134		156	179
3	10	25		47		69		91		113		135	50	157	180
4		26	10	48		70		92		114	60	136		158	181
5		27	10	49		71		93		115		137		159	182
6	300	28	100	50		72		94		116		138		160	183
7		29		51		73		95		117		139	10	161	184
8		30		52		74		96		118	10	140	20	162	185
9		31		53		75		97		119	10	141	10	163	186
10		32		54		76		98		120	10	142	100	164	187
11		33		55	800	77		99		121	20	143	80	165	188
12		34		56		78		100		122		144		166	189
13		35	50	57		79		101		123		145		167	190
14		36		58		80		102	21	124		146	10	168	191
15		37	40	59		81		103	28	125	20	147	50	169	192
16		38		60		82		104		126	10	148	10	170	273
17		39	40	61	10	83		105		127		149	90	171	225
18	370	40	50	62		84		106		128		150	40	172	195
19		41		63		85		107	20	129		151		173	196
20	400	42		64		86		108	20	130		152		174	197
21	20	43		65		87		109	20	131	50	153		175	198
														176	199

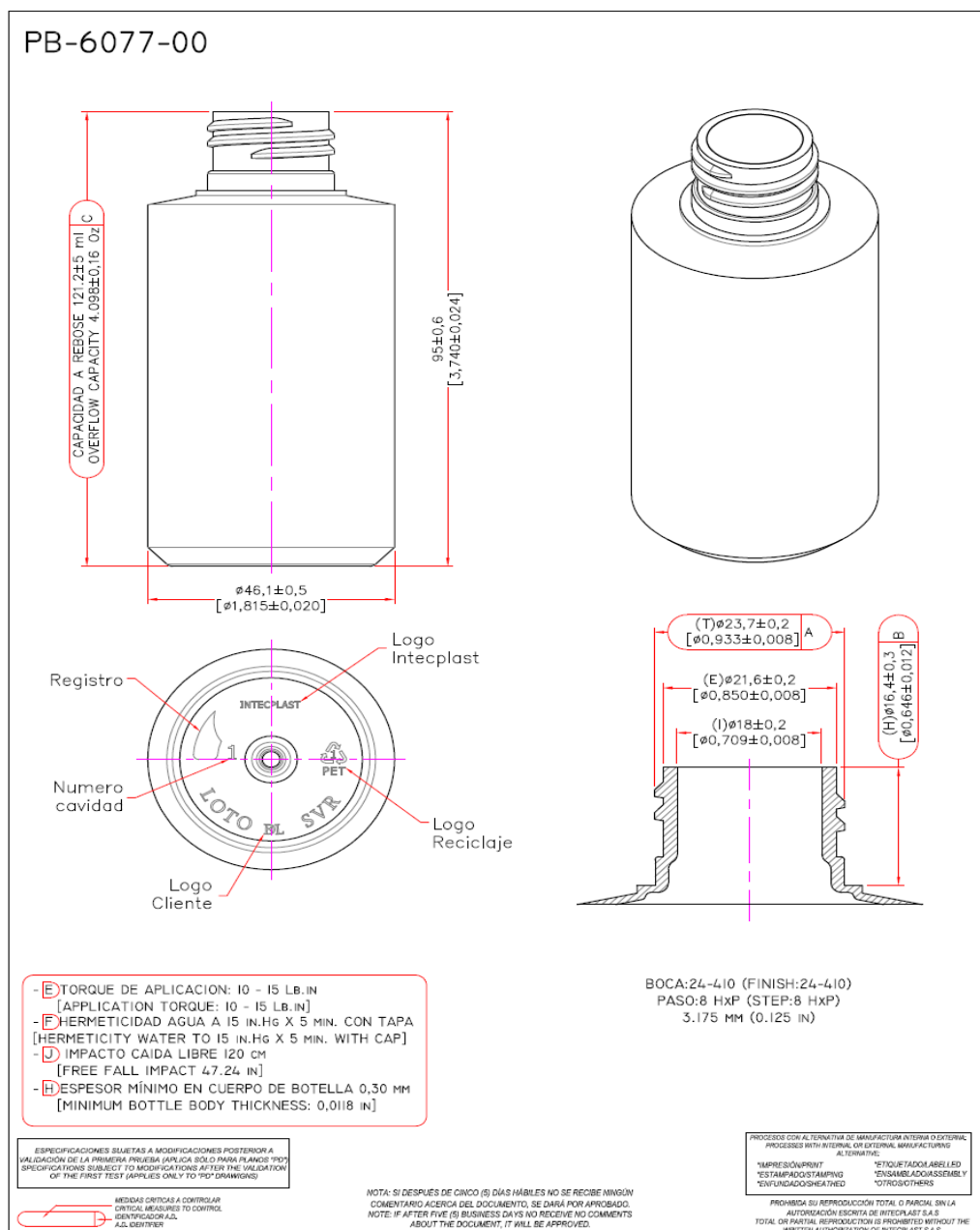
OBSERVACIONES

Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

12.3 Cumplimiento dimensional del envase

La prueba piloto ampliada con 3.000 envases permitió evaluar la repetibilidad del proceso y el cumplimiento de las especificaciones comparadas con lo definido en el plano del envase.

Figura 3. Plano para producción envase cilíndrico x 100 ml Boca 24-410 mm



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

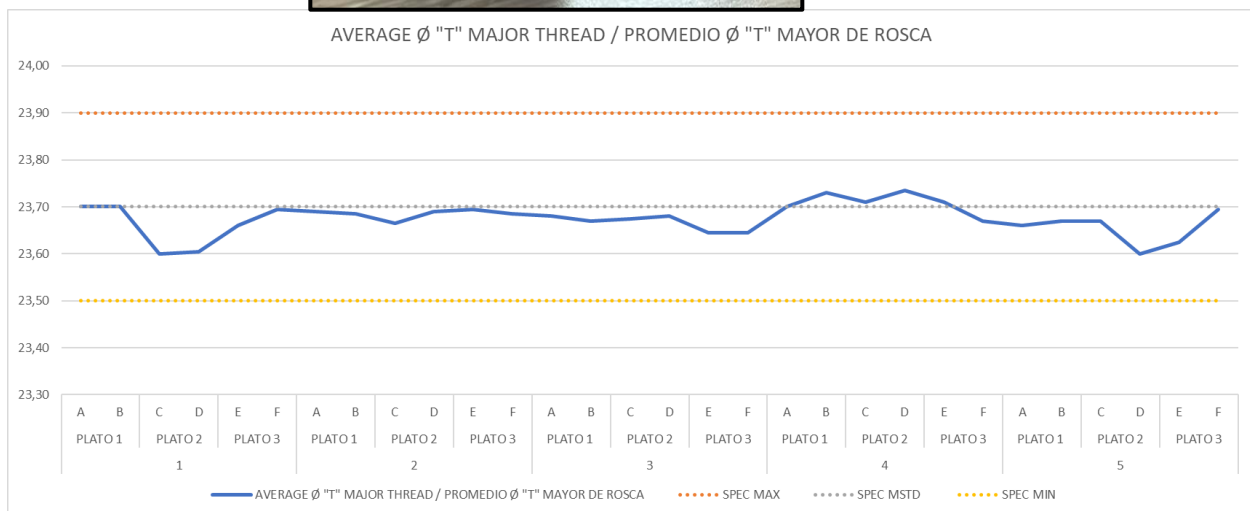
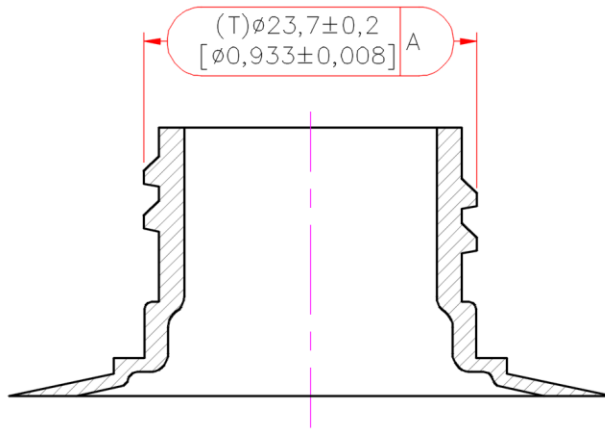
Figura 4. análisis de los resultados de los parámetros dimensionales.

CHARACTERISTICS / CARACTERÍSTICAS	DRAWING SPECIFICATIONS / ESPECIFICACIONES DEL PLANO				Total average	Result	S	Maximum	Minimum	X LC	Difference	Cp	Cpk	MAXIMUM	MINIMUM	AVERAGE
MEASURE NAME / NOMBRE DE LA MEDIDA	MEASURE / MEDIDA	TOLERANCE / TOLERANCIA	MAX	MIN												
ALTURA TOTAL 0°	95,50	1,00	96,50	94,50	95,38	GOOD	0,21	95,60	95,00	95,38	0,62	1,60	1,41			
ALTURA TOTAL 90°	95,50	1,00	96,50	94,50	95,44	GOOD	0,15	95,60	95,00	95,44	0,45	2,20	2,08	95,61	95,00	95,31
ALTURA TOTAL 180°	95,50	1,00	96,50	94,50	95,46	GOOD	0,15	95,60	95,00	95,46	0,45	2,23	2,14			
ALTURA TOTAL 270°	95,50	1,00	96,50	94,50	95,41	GOOD	0,20	95,61	95,00	95,41	0,60	1,67	1,52			
"H" ALTURA CUELLO 0°	16,40	0,30	16,70	16,10	16,41	GOOD	0,06	16,54	16,29	16,41	0,19	1,55	1,52			
"H" ALTURA CUELLO 90°	16,40	0,30	16,70	16,10	16,39	GOOD	0,07	16,56	16,25	16,39	0,21	1,46	1,39	16,65	16,22	16,44
"H" ALTURA CUELLO 180°	16,40	0,30	16,70	16,10	16,39	GOOD	0,07	16,63	16,22	16,39	0,22	1,38	1,34			
"H" ALTURA CUELLO 270°	16,40	0,30	16,70	16,10	16,40	GOOD	0,07	16,65	16,30	16,40	0,21	1,40	1,38			
Ø "I" INTERNO 0°	18,00	0,20	18,20	17,80	17,94	GOOD	0,02	17,97	17,88	17,94	0,07	2,73	1,88	18,01	17,88	17,95
Ø "I" INTERNO 90°	18,00	0,20	18,20	17,80	17,98	GOOD	0,03	18,01	17,92	17,98	0,08	2,51	2,22			
Ø "E" MENOR DE ROSCA 0°	21,60	0,20	21,80	21,40	21,57	GOOD	0,04	21,65	21,47	21,57	0,12	1,64	1,36	21,65	21,47	21,56
Ø "E" MENOR DE ROSCA 90°	21,60	0,20	21,80	21,40	21,57	GOOD	0,04	21,64	21,48	21,57	0,12	1,64	1,38			
Ø "T" MAYOR DE ROSCA 0°	23,70	0,20	23,90	23,50	23,67	GOOD	0,04	23,73	23,57	23,67	0,12	1,72	1,43	23,75	23,57	23,66
Ø "T" MAYOR DE ROSCA 90°	23,70	0,20	23,90	23,50	23,68	GOOD	0,04	23,75	23,60	23,68	0,12	1,70	1,56			
Ø MAYOR CUERPO 0°	46,10	0,50	46,60	45,60	46,21	GOOD	0,02	46,25	46,16	46,21	0,07	6,94	5,47	46,25	45,97	46,11
Ø MAYOR CUERPO 90°	46,10	0,50	46,60	45,60	46,01	GOOD	0,02	46,04	45,97	46,01	0,05	9,74	8,06			
PESO (g)	15,5	1,0	16,50	14,50	15,58	GOOD	0,03	15,62	15,51	15,58	0,08	11,81	10,91	15,62	15,51	15,57
CAPACIDAD A REBOSE (ml)	121,2	5,0	126,20	116,20	121,81	GOOD	0,30	122,27	121,18	121,81	0,89	5,62	4,93	122,27	121,18	121,73

Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

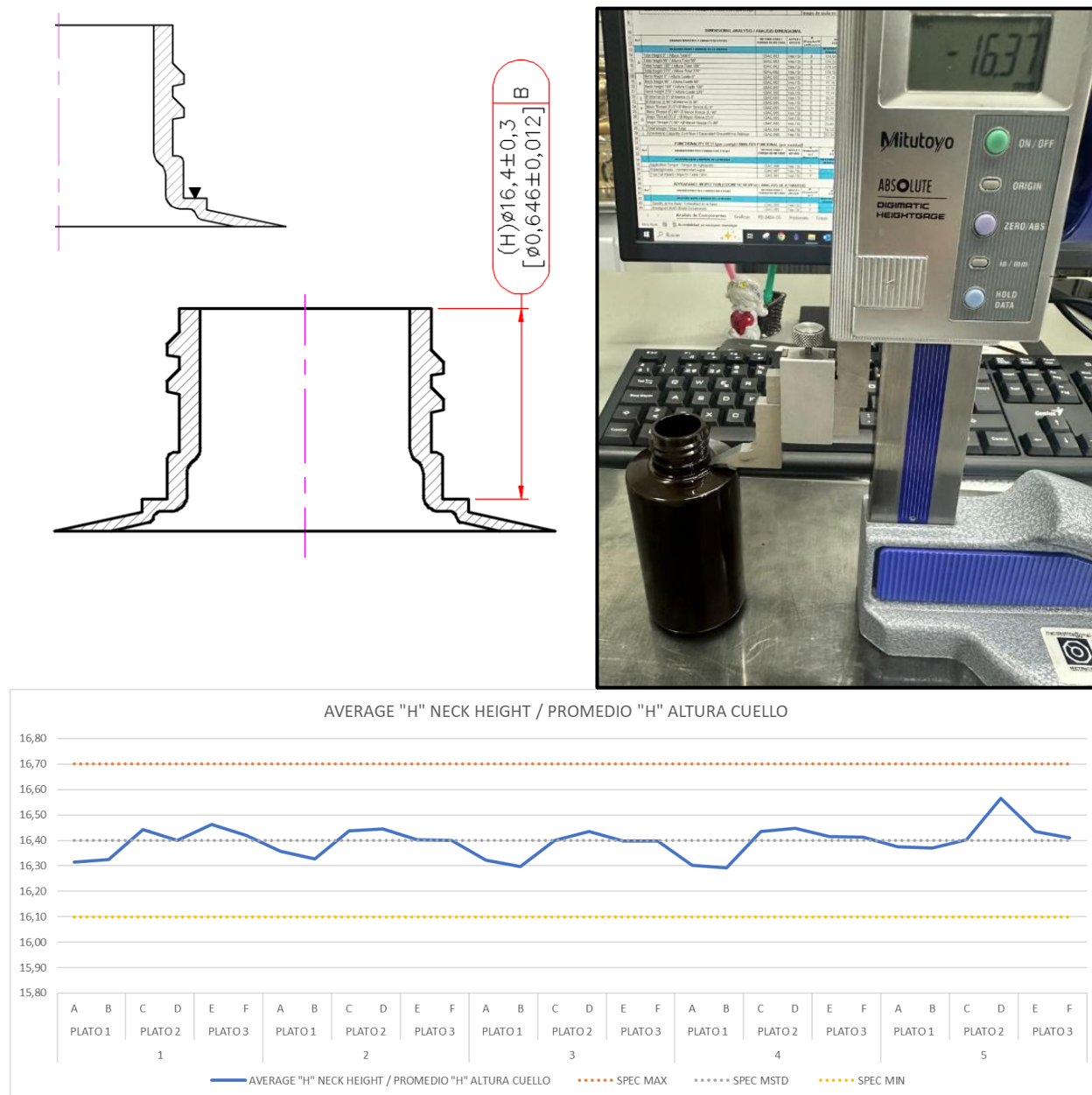
El análisis estadístico descriptivo evidencia que el envase cumple satisfactoriamente con las especificaciones dimensionales establecidas en el diseño técnico. Los resultados muestran un proceso estable, centrado y altamente capaz, con baja variabilidad y amplio margen de cumplimiento frente a los límites de especificación. Asimismo, los índices Cp y Cpk obtenidos confirman que el proceso de fabricación presenta un desempeño robusto y consistente para todas las características críticas evaluadas.

Figura 5 Análisis dimensional, Diámetro (T) mayor de rosca $\varnothing 23.70 \pm 0,20$ mm



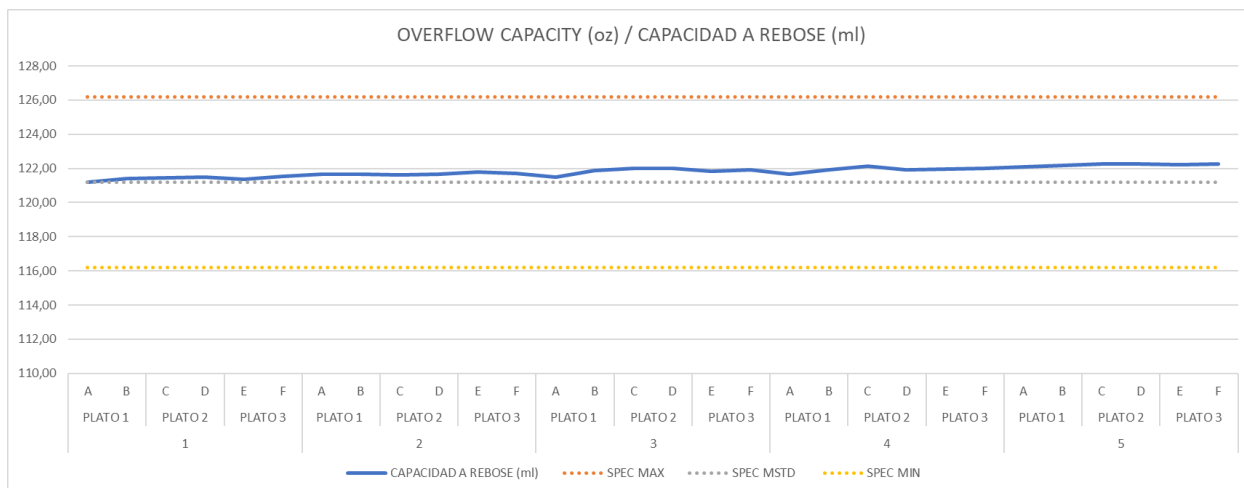
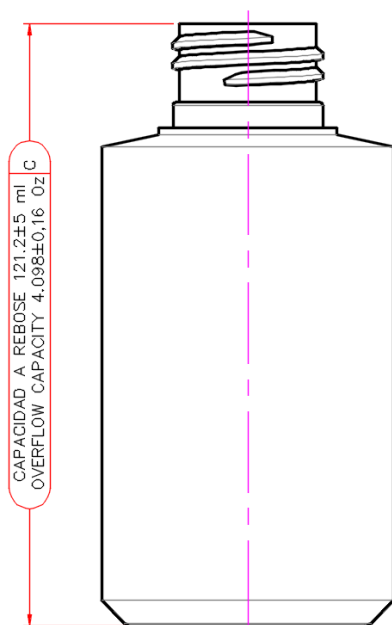
Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

Figura 6. Análisis dimensional, Altura de cuello $16,40 \pm 0,30$ mm



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

Figura 7. Análisis dimensional, Capacidad volumétrica a rebose 121,20±5 ml

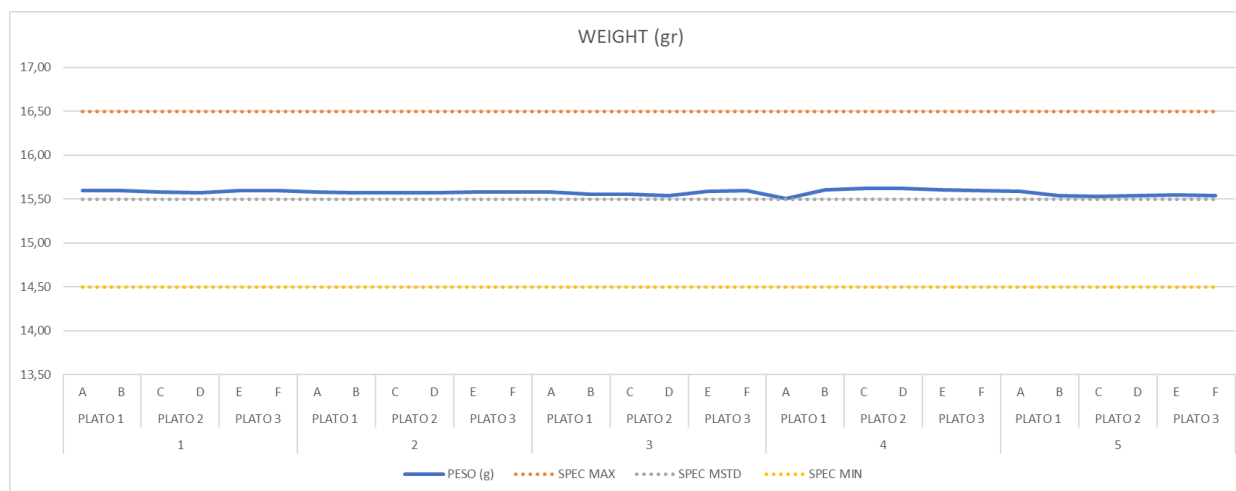


Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

Figura 8. Análisis dimensional, peso $15,5 \pm 1$ gramos

PESO/WEIGHT:

15.5 ± 1 G D



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

12.4 Cumplimiento visual del envase

El 94,9 % de los envases no presentó defectos visibles, mientras que el 5,1 % restante mostró hallazgos de severidad menor. La estabilidad del envase fue el hallazgo más frecuente (2,6 %). Los puntos negros (1,0 %) y la distribución irregular de espesor (0,8 %) son indicios de que conviene mantener un control estricto del lote de rPET y de la temperatura de

calentamiento. En conjunto, los hallazgos visuales se ubican dentro de los rangos aceptables para un piloto de validación.

Tabla 2. Análisis de los resultados del aspecto visual.

Tipo de hallazgo visual	Unidades	% del lote
Sin defectos visibles	2.847	94,9
Estabilidad del envase	78	2,6
Puntos negros	31	1,0
Distribución irregular del espesor	24	0,8
Marcas de proceso menores	20	0,7
Total, inspeccionado	3.000	100,0

Fuente: elaboración propia

Figura 9. Evidencia de envases Inyectados soplados.



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

12.5 Compatibilidad con etiqueta envolvente

De los 3.000 envases producidos, 2.937 unidades fueron sometidas a la operación de etiquetado envolvente, mientras que los 63 restantes se reservaron como muestra testigo. La aplicación de etiqueta arrojó 2.901 unidades conformes (98,8 %) y 36 no conformes (1,2 %). Los problemas registrados corresponden a etiquetas con leve arrugado en la zona de cierre de la envolvente y a tres casos de adherencia parcial. Ninguno de los hallazgos fue catalogado como crítico, y todos los lotes etiquetados resultaron utilizables tras una segunda inspección.

Figura 10. Evidencia de envases etiquetados.



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

La estabilidad mecánica del envase durante el etiquetado, medida por la ausencia de deformaciones bajo el cabezal de aplicación, fue satisfactoria. Esto sugiere que la mezcla 70/30 conserva la rigidez necesaria para la operación de acondicionamiento, sin que la incorporación del rPET haya generado un comportamiento anómalo en esta etapa.

12.6 Cumplimiento funcional del envase

Las pruebas funcionales realizadas sobre 75 envases cumplen respecto a las especificaciones y muestran estabilidad del envase.

Figura 11. Prueba funcional, caída libre a 120 cm.



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

Figura 12. Prueba Hermeticidad, campana de vacío.



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

Figura 13. Prueba torque de cierre, torquímetro.



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.

12.7 Estabilidad operativa del proceso

Durante la prueba piloto ampliada, el proceso operó de forma continua durante 3,5 horas. Se registraron tres paros menores —un cambio de bobina de etiqueta, una limpieza de molde programada y un ajuste de temperatura de zona dos— y ningún paro asociado al material. La frecuencia de defectos se mantuvo estable a lo largo del lote, sin tendencia ascendente que sugiriera degradación progresiva del polímero por residencia prolongada. El control SPC sobre el peso del envase mostró que todos los puntos cayeron dentro de los límites de control de tres desviaciones estándar, con dos llamados de atención por tendencia que no llegaron a constituir alarma.

13. Análisis de resultados

Los datos de caracterización del material confirman que la mezcla 70/30 ingresa al proceso en condiciones compatibles con los rangos descritos por la literatura técnica para PET botella. La viscosidad intrínseca calculada (0,79 dL/g) y la humedad inferior a 50 ppm minimizan el riesgo de degradación hidrolítica durante el moldeo, lo que se traduce directamente en la baja frecuencia de defectos visuales observada (5,1%) y en la estabilidad dimensional del envase (conformidad del 100% en todas las variables medidas).

La identificación de la ventana operativa mediante pruebas de laboratorio muestra que el proceso es sensible a la temperatura de calentamiento de la preforma y a la presión de soplado. Esto coincide con la naturaleza del proceso ISBM y refuerza la idea de que cualquier cambio futuro en el lote de rPET debe ir acompañado de una revalidación de la ventana, no solo de una sustitución directa.

La compatibilidad con la etiqueta envolvente, con un 98,8 % de unidades conformes, indica que la rigidez y la geometría del envase se conservaron pese a la incorporación de rPET. Este es un resultado relevante porque varias preocupaciones operativas en el sector cosmético giran precisamente alrededor de la línea de acondicionamiento: si el envase se deforma o pierde redondez, las máquinas de etiquetado pierden eficiencia. La evidencia recogida descarta esa hipótesis para esta formulación.

14. Conclusiones

La evidencia experimental obtenida en el piloto ampliado muestra que la formulación se procesa con estabilidad operativa, produce envases dimensionalmente conformes, mantiene una calidad visual mayoritariamente aceptable y resulta compatible con la operación de etiquetado envolvente. Las cuatro condiciones definidas como criterio de viabilidad técnica se cumplen de forma simultánea, por lo que la formulación se considera técnicamente viable en los términos del presente estudio.

La medición confirmó viscosidad intrínseca de 0,79 dL/g para la mezcla, humedad residual entre 32 y 49 ppm tras el secado, y ausencia de contaminantes visibles. Estos valores ubicaron al material dentro del rango operativo recomendado y permitieron descartar, antes del moldeo, las principales causas de fallo asociadas al rPET (degradación hidrolítica, viscosidad intrínseca insuficiente, contaminación visible).

Las pruebas iniciales identificaron una ventana operativa estable y mostraron que la temperatura de calentamiento de la preforma y la presión de soplado son las variables con efecto sobre la calidad del envase. Durante la prueba ampliada, el proceso operó 3,5 horas sin paros asociados al material, confirmando la estabilidad de la ventana identificada.

El 100 % de las variables dimensionales medidas cumplieron con las especificaciones y un $Cpk > 1.33$, y el 94,9% de los envases no presentó defectos visibles. Se evidencia inestabilidad del envase en el 2,6% del lote es un hallazgo esperado para una formulación con 30% de rPET y debe gestionarse como variable de diseño, no como falla del material. La conformidad funcional fue completa: no se reportaron problemas de hermeticidad, torque de cierre ni fractura de envase en caída libre.

El 98,8 % de las unidades etiquetadas resultó conforme, sin hallazgos críticos, y el envase conservó rigidez suficiente para la operación de acondicionamiento. Con base en la convergencia de los cuatro objetivos específicos, se concluye que la formulación 70 % PET virgen / 30 % rPET constituye una alternativa industrial viable para el envase cosmético de 100 ml estudiado.

15. Recomendaciones

Se recomienda realizar prueba industrial con mínimo de 20.000 unidades para validar el comportamiento en condiciones reales de fabricación.

16. Referencias

- Alvarado Chacon, F., Brouwer, M. T., & Thoden van Velzen, E. U. (2020). Effect of recycled content and rPET quality on the properties of PET bottles, part I: Optical and mechanical properties. *Packaging Technology and Science*, 33(8), 347–357.
<https://doi.org/10.1002/pts.2490>
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Injection stretch blow moulding process of reactive extruded recycled PET and virgin PET blends. *European Polymer Journal*, 41(11), 2614–2634.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.036>
- Comunidad Andina. (2002). Decisión 516: Armonización de legislaciones en materia de productos cosméticos. <https://www.comunidadandina.org/StaticFiles/DocOf/DEC516.pdf>
- FECISION. (2025). PET injection molding services: Custom manufacturing.
<https://fecision.com/pet-injection-molding/>
- Gatt, I. J., & Refalo, P. (2022). Reusability and recyclability of plastic cosmetic packaging: A life cycle assessment. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200098.
<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200098>
- Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos. (s.f.). Cosméticos.
<https://www.invima.gov.co/cosmeticos-aseo-plaguicidas/cosmeticos>
- ITC Packaging. (s.f.). Recycled PET (rPET), suitable for food contact and cosmetics.
<https://www.itc-packaging.com/en/sustainability/recycled-pet-rpet-packaging/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Resolución 1407 de 2018.
<https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1407-de-2018/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular.
<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-yurbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>

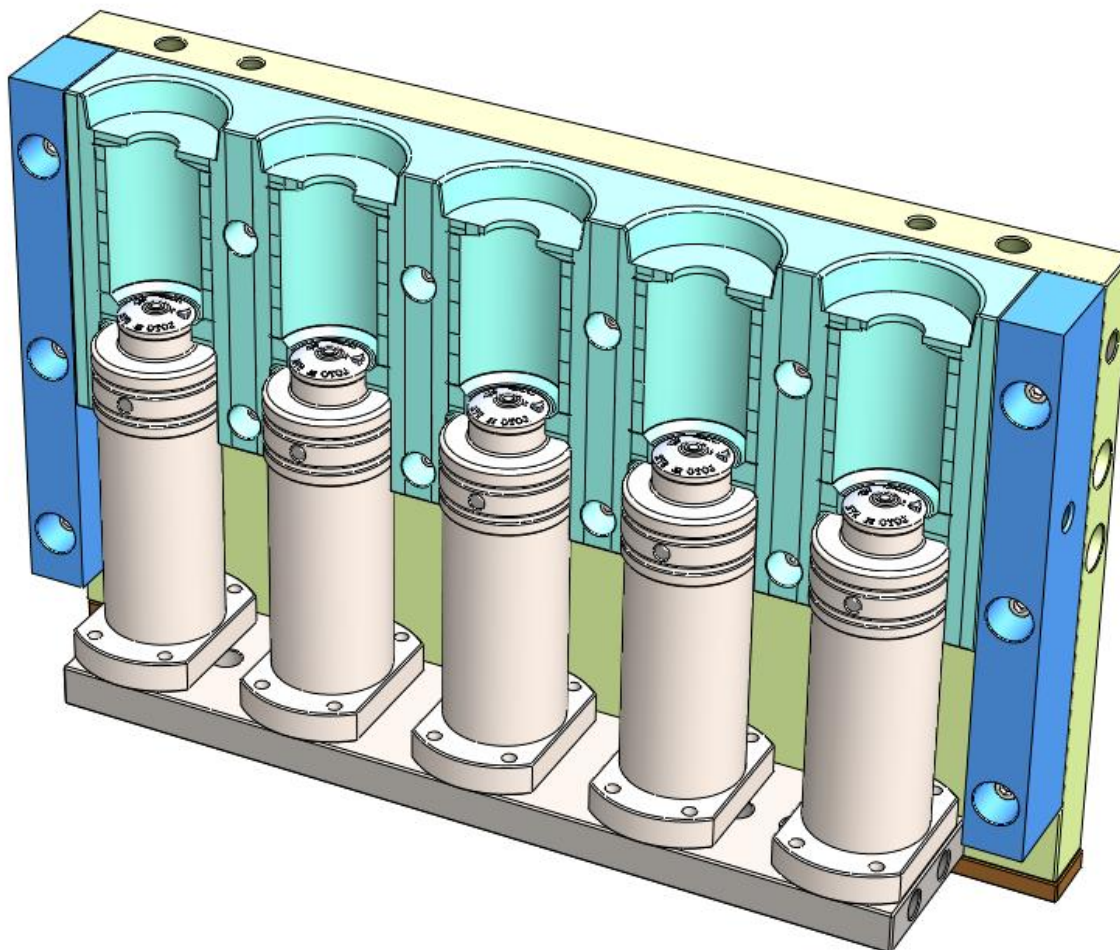
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. OECD Publishing.
https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html
- Plastico.com. (2025). PET virgen vs. PET reciclado (rPET): comparativa de propiedades, costos y seguridad para envases en LATAM. <https://www.plastico.com/noticias/pet-virgen-vs-pet-reciclado-rpet-comparativa-de-propiedades-costos-y-seguridad-para-envases-en-latam>
- Plastics Technology. (2018). How to dry PET for container applications.
<https://www.ptonline.com/articles/how-to-dry-pet-for-container-applications>
- SIPA. (2025). Ho.Bag: Injection stretch-blow molding machines for rPET packaging.
<https://sipasolutions.com/blog/hobag-injection-stretch-blow-molding-machines-for-rpet-packaging>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). Informe sectorial de la actividad de aprovechamiento – 2023. <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Sectorial-de-la-Actividad-de-Aprovechamiento-2023.pdf>
- TLD Vietnam. (2026). PET injection molding guideline: A complete guide.
<https://tldvietnam.com/products/pet-injection-molding/>
- Viora, L., Combeau, M., Pucci, M. F., Perrin, D., Liotier, P.-J., Bouvard, J.-L., & Combeaud, C. (2023). A comparative study on crystallisation for virgin and recycled polyethylene terephthalate (PET): Multiscale effects on physico-mechanical properties. *Polymers*, 15(23), 4613. <https://doi.org/10.3390/polym15234613>
- Wawrzyniak, P., Karaszewski, W., & Różański, A. (2024). Effect of rPET content and preform heating/cooling conditions in the stretch blow molding process on microcavitation and solid-state post-condensation of vPET-rPET blend. *Materials*, 17(21), 5233. <https://doi.org/10.3390/ma17215233>

Zapata Bravo, A., Vieira Escobar, V., Zapata-Domínguez, A., & Rodríguez-Ramírez, A. (2021).

La economía circular de las botellas PET en Colombia. Cuadernos de Administración, 37(70), e2310912. <https://doi.org/10.25100/cdea.v37i70.10912>

Anexos

Anexo 1. Molde empleado en la prueba para envase cilíndrico x 100 ml Boca 24-410 mm



Fuente: Registro interno de la empresa objeto de estudio. Información confidencial, 2026.