

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Elaboración de una tubería de PVC rígida para ventilación a partir de residuos de
PVC

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Luis Joshua Balladares Chacón

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Luis Joshua Balladares Chacón y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.

A handwritten signature in blue ink that reads "Luis Balladares". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping flourish over the name.

Luis Joshua Balladares Chacón

Evaluadores

Jonathan Reyes O., MPhil

Profesor de Materia

Andrés Rigail., Ph. D.

Tutor de proyecto

Resumen

Las industrias encargadas de producir tuberías plásticas generan grandes cantidades de residuos degradados al año, por su composición resulta difícil reutilizarlo, ya que este material se caracteriza por presentar rupturas en los enlaces covalentes lo que imposibilita formar superficies homogéneamente plastificadas, por ello, el presente proyecto busca aprovechar estos residuos para elaborar tuberías para uso en ventilación.

El desarrollo de este proyecto conllevó 3 formulaciones las cuales contienen aditivos, estabilizantes, rellenos, PVC virgen y PVC degradado, los cuales fueron evaluadas reológicamente mediante parámetros de plastificación y degradación. Siguiendo esta metodología, la fórmula 3 fue la seleccionada para la producción de tuberías de ventilación, con el objetivo de evaluarlas mediante políticas internas de la empresa basadas en la normativa INEN 2474. Las tuberías obtenidas se evaluaron mediante ensayos físicos-químicos; los resultados de los ensayos indican que la tubería es capaz de soportar la aplicación para la cual va a ser usada, sin embargo, ésta presentó picaduras en la superficie interna y externa. En cuanto a costos, resulta rentable en el mercado ecuatoriano gracias a su bajo costo de materia prima y fabricación.

Palabras Clave: cloruro de polivinilo, extrusión, tubería, calidad.

Abstract

The industries in charge of producing plastic pipes generate large amounts of degraded waste per year, due to its composition it is difficult to reuse it, since this material is characterized by ruptures in the covalent bonds, which makes it impossible to form homogeneously plasticized surfaces, therefore, this project seeks to take advantage of this waste to produce pipes for ventilation use.

The development of this project involved 3 formulations containing additives, stabilizers, fillers, virgin PVC and degraded PVC, which were evaluated rheologically by means of plasticization and degradation parameters. Following this methodology, formula 3 was selected to produce ventilation pipes, with the objective of evaluating them by means of internal company policies based on INEN 2474 standards. The pipes obtained were evaluated by means of physical-chemical tests; the results of the tests indicate that the pipe could support the application for which it is going to be used, however, it presented pits on the internal and external surface. In terms of cost, it is profitable in the Ecuadorian market thanks to its low raw material and manufacturing costs.

Keywords: polyvinyl chloride, extrusion, pipe, quality

Indice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Indice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Indice de figuras.....	VIII
Indice de tablas.....	IX
Capítulo 1.....	1
Introducción.....	2
1.1. Descripción del Problema.....	2
1.2. Justificación del Problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Marco teórico.....	4
1.4.1. PVC reciclado y su proceso de obtención.....	4
1.4.2. Proceso de extrusión de tuberías de PVC.....	5
1.4.3. Aplicaciones usando residuos de PVC.....	6

1.4.3.1.	Tubería multicapa de PVC reciclado micronizado y proceso para obtenerla....	6
1.4.3.2.	Reciclaje de tubería de PVC para fluido térmico.	8
	Capítulo 2.....	10
	Metodología	11
2.1.	Diseño Conceptual	12
2.1.1.	Requerimientos para la materia prima.	12
2.1.2.	Procedimiento experimental.....	14
2.1.3.	Alternativas de diseño	15
2.1.3.1.	Alternativa 1: Fórmula gris ventilación 1	16
2.1.3.2.	Alternativa 2: Fórmula gris ventilación 2.....	17
2.1.3.3.	Alternativa 3: Fórmula gris ventilación 3.....	18
2.2.	Materiales.....	20
2.2.1.	PVC degradado	20
2.2.2.	Estabilizador térmico.....	21
2.2.3.	Rellenos.....	21
2.2.4.	Lubricantes	21
2.2.5.	Pigmentos	22
2.3.	Requerimientos de diseño de tubería.	22
2.3.1.	Presión hidrostática interna	23
2.3.2.	Resistencia al impacto.....	23

2.3.3. Temperatura de ablandamiento VICAT	23
2.3.4. Resistencia química.....	24
Capítulo 3.....	25
Resultados y análisis	26
3.1. Ensayos mecánicos	26
3.1.1. Prueba de presión hidrostática interior.....	26
3.1.2. Resistencia al impacto.....	27
3.1.3. Temperatura de ablandamiento Vicat	28
3.2. Ensayo químico (Acetona).....	29
3.3. Análisis financiero	30
3.2.1. Viabilidad Económica del Proyecto.....	31
3.2.1.1. Valor Actual Neto (VAN)	32
3.2.1.2. Tasa Interna de Retorno (TIR).....	33
Capítulo 4.....	34
Conclusiones y recomendaciones	35
4.1. Conclusiones.....	35
4.2. Recomendaciones	36
Referencias.....	36
Apéndices.....	39

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

PVC Cloruro de Polivinilo

PEAD Polietileno de alta densidad

PP Polipropileno

NTE Normativa Técnica Ecuatoriano

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización

PE Polietileno

Simbología

Kg	Kilogramo
g	Gramo
cm ³	Centímetro cúbico
min	Minuto
°C	Grado celsius
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
S	Segundo
Tn	Tonelada
MPa	Megapascal
Ca	Calcio
Zn	Zinc
Nm	Newton metro
RPM	Revoluciones por minuto

Indice de figuras

Figura 1.1. Procesos del reciclaje del PVC.....	5
Figura 1.2. Extrusión de tuberías de PVC.....	5
Figura 1.3. Tubería para fluido térmico.....	8
Figura 2.1. Diagrama de metodología de diseño.....	11
Figura 2.2. Preparación del compuesto.....	15
Figura 3.1. Tubería de ventilación a partir de material reciclado de PVC.....	26
Figura 3.2. Prueba de presión hidrostática interna.....	26
Figura 3.3. Ensayo de resistencia al impacto.....	27
Figura 3.4. Probetas evaluadas mediante resistencia al impacto.....	27
Figura 3.5. Equipo de ablandamiento Vicat.....	28
Figura 3.6. Probetas en evaluación usando equipo Vicat.....	28
Figura 3.7. Probetas evaluadas en acetona.....	29

Índice de tablas

Tabla 1.1. Capa compacta (interior y exterior) para tubería multicapa	7
Tabla 1.2. Capa intermedia para tubería multicapa	7
Tabla 1.3. Fórmula de tubería de refrigeración y calefacción	9
Tabla 2.1. Parámetros de influencia.....	12
Tabla 2.2. Ponderación de los criterios para selección de fórmula de tubería.....	13
Tabla 2.3. Fórmula 1 para tubería gris ventilación	16
Tabla 2.4. Fórmula 2 para tubería gris ventilación	17
Tabla 2.5. Fórmula 3 para tubería gris ventilación	19
Tabla 2.6. Matriz de decisión.....	20
Tabla 2.7. Requerimientos de diseño para la tubería de ventilación	22
Tabla 3.1. Datos de la tubería de ventilación.....	30
Tabla 3.2. Costos de la producción y precio de venta	31
Tabla 3.3. Flujo efectivo a 5 años	32
Tabla 3.4. Cálculo del valor actual neto (VAN)	33
Tabla 3.5. Cálculo de la tasa de interna de retorno (TIR).....	34

Capítulo 1

Introducción

El cloruro de polivinilo (PVC) es el segundo termoplástico más vendido en los mercados actuales, ha sido producido por más de 50 años en las industrias de construcción, automotriz, tuberías, cables y artículos para el hogar, debido, a su dureza, fuerza, versatilidad y ligereza; para estas propiedades, se necesitan diferentes aditivos (estabilizadores, lubricantes, modificadores de impacto, entre otros), permitiendo así producir una amplia gama de productos (tuberías, perfiles, revestimientos de suelos, recubrimientos de cables, películas de embalaje, botellas y productos médicos) con una vida útil de más de 10 años [1], [2].

Los productos fabricados por las diversas industrias generan grandes cantidades de desperdicios, muchas veces son originados por cortes imprevistos de energía o por restos almacenados de materia prima dentro de las extrusoras; solo en Europa, la producción de estos artículos produce alrededor de 6.4 millones de toneladas de residuos por año [3], por lo que es necesario una gestión adecuada para su reciclaje.

Los residuos por lo general provienen de fallas imprevistas en las líneas de producción. Estos residuos tienen varios problemas como degradación térmica y mezcla de aditivos, [1], [4]; pero, estudios revelan que el PVC degradado es posible reutilizarlo usando un porcentaje mayor al 30% en la mezcla del compuesto virgen [1].

1.1. Descripción del Problema

En el Ecuador existen 600 empresas dedicada a la producción de productos plásticos, una empresa en particular fabrica durante el año 27,147 toneladas de tuberías de plástico usando PVC a través del proceso de extrusión, en varias ocasiones durante este proceso se presentan fallas en los calentadores (resistencias), esta falla provoca un sobrecalentamientos excesivo del barril y esto a su vez calienta el material dentro de la extrusora, en otras ocasiones ocurren cortes

de energía eléctrica lo que provoca que el material dentro de la extrusora quede atrapado quemándose ya que el tornillo no está en movimiento, y es así como se generan alrededor de 60 toneladas de material degradado durante el año.

La empresa no utiliza este material en sus líneas de producción, debido a que su estructura molecular se encuentra dañada, por ende, estos residuos no se les puede dar ningún uso y queda almacenados por largo tiempo. Para recuperar los costos de este material, se lo tritura y pulveriza con el objetivo de comercializarlo en el exterior a \$0.33 el kilogramo (kg), pero no produce suficientes ganancias.

1.2. Justificación del Problema

Este estudio busca la reutilización del PVC degradado ya que es un material con rupturas en sus enlaces atómicos lo que imposibilita la formación de nuevas cadenas para formar polímeros, por ello, se deja apartado de la producción para ser almacenado, pero debido a la alta demanda de tuberías de PVC se sigue generando grandes cantidades de material degradado y la empresa no puede permitirse almacenarlo por largo tiempo, ya que esto conlleva en gastos de almacenamiento y movilización. Para reducir eficientemente el material degradado, se optó por fabricar una tubería plástica de PVC mezclada con material virgen cuyo objetivos es aprovechar de mejor manera el material degradado generado en la empresa, producir nuevas ganancias, reducir el consumo de material virgen, abrir una nueva línea de producción y cumplir con uno de los objetivos del desarrollo sostenible (Producción y Consumo Responsable).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar una tubería rígida de PVC a partir de residuos pulverizados de PVC mediante el proceso de extrusión para ventilación de los sistemas de conducción de aguas residuales, aguas lluvias y/o aguas negras.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la calidad de la tubería de ventilación de PVC con material degradado mediante la norma interna de la empresa basada en la normativa INEN 2474.
- Analizar los costos de fabricación para verificar su rentabilidad en el mercado ecuatoriano a través de un estudio financiero.

1.4. Marco teórico

En este apartado se presentarán diversas investigaciones y aplicaciones enfocadas en el PVC reciclado pulverizado.

1.4.1. PVC reciclado y su proceso de obtención

El PVC reciclado es un material compuesto no uniforme químicamente que puede ser reutilizado mediante reciclaje mecánico o reciclaje de materias primas; sin embargo, el mejor método es el reciclaje mecánico, este consiste en pulverizarlo hasta un tamaño de partícula aproximado al grano del PVC virgen ya que no altera sus propiedades. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el PVC reciclado tiene varios agentes aditivos que dificultan su reprocesamiento [5]. El proceso del reciclado se lo realiza siguiendo un proceso mecánico, tiene

la ventaja de no alterar la estructura química del material, lo que permita su reciclaje [6]. El proceso de reciclado es el siguiente (Ver figura 1.1).



Figura 1.1. Procesos del reciclaje del PVC [6]

Primero, se recolectan los productos a reciclar, luego se los clasifica de acuerdo con el material (PE, PP, PVC), después se lo tritura y muele hasta un tamaño de partícula similar al producto virgen, a continuación, se lo lava y seca para finalmente obtener el PVC reciclado [6]. Este proceso de reutilizar el PVC en compuestos vírgenes ahorra hasta un 90% de energía [5].

1.4.2. *Proceso de extrusión de tuberías de PVC*

El procesamiento de tuberías de PVC en la extrusora se lo realizó comúnmente a un rango de temperaturas de entre 170 – 200 °C, para su procesamiento se siguió el siguiente procedimiento, el material ingresa por la tolva, el barril y el tornillo cizallan el material y lo gelifican mediante rotación, a continuación, en el tanque de enfriamiento, el calibrador dimensiona mientras que el WATER SPRAY enfría y da resistencia para finalmente un cortador le da las longitudes deseadas a la tubería como se observa en la figura 1.2.

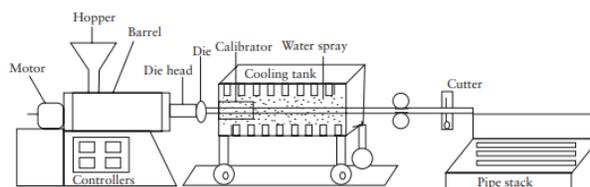


Figura 1.2. Extrusión de tuberías de PVC [7]

Aparte, para asegurar un correcto procesamiento se debe cuidar la velocidad de arrastre de la tubería ya que depende de la dimensión y las condiciones de extrusión por lo que debe ejecutarse con precisión por ello se debe controlar la formulación, composición, viscosidad y velocidad del tornillo durante este proceso [7].

1.4.3. Aplicaciones usando residuos de PVC

Los productos elaborados con residuos PVC se los detalla en las siguientes investigaciones.

1.4.3.1. Tubería multicapa de PVC reciclado micronizado y proceso para obtenerla.

Esta investigación se enfocó en elaborar tubos multicapa de PVC reciclado micronizado con un diámetro exterior de 110–500 mm, tolerancia de entre 0.3 - 0.9 mm, rigidez de 2 – 12 kN, espesor de pared 2.2 – 16.5 mm; mediante el proceso de extrusión y coextrusión, esta tubería fue formada por 3 capas, de las cuales, 2 capas están elaboradas de PVC compacto virgen K 64-68 cuya densidad es de (1.45 – 1.9 g/cm³); una capa forma la superficie interior y la otra capa forma la superficie exterior en la tubería, mientras, que la capa intermedia es elaborada a menor densidad (0.55 – 0.9 g/cm³) a partir de PVC reciclado micronizado; este producto se enfocó en instalaciones de alcantarillado. Su proceso de fabricación consistió en utilizar dosificadores cuya función es mezclar el compuesto hasta una temperatura de 110 – 130 °C y luego enfriar hasta una temperatura de 40 – 50°C en un enfriador. Las tuberías multicapa de PVC consta de los siguientes componentes (ver tabla 1.1 y 1.2) [8].

Tabla 1.1. Capa compacta (interior y exterior) para tubería multicapa [8]

Materia Prima	Rango [wt %]
PVC K 64-68	56 – 86.9
Carbonato de calcio	8.6 – 37.3
Parafina sintética	0.2 – 0.6
Modificador de Procesamiento	0.6 – 1.6
Óxido homopolímero de PEAD	Hasta 0.7
Cera de Polietileno	0.2 - 0.6
Colorante	0.9 – 1.1

Tabla 1.2. Capa intermedia para tubería multicapa [8]

Materia Prima	Rango [wt %]
PVC reciclado micronizado	65.8 – 88.4
Carbonato de calcio	4.5 – 21.8
Azodicarbonamida	0.2 – 0.4
Estabilizador térmico Ca-Zn	2.2 – 3.3
Modificador de Procesamiento	0.1 – 0.7
Óxido homopolímero de PEAD	0.1 - 0.7
Cera de Polietileno	0.1 - 0.7

Para esta idea se usó PVC virgen de grado K 64 o grado K 68 estas resinas se caracterizan por tener alto peso molecular, alta cristalinidad y baja densidad aparente lo que

provoca una fusión más lenta, temperatura de procesamiento mayor, mayor longitud en su cadena molecular lo que son características ideales para el proceso de extrusión ya que este es un proceso de fusión lento lo que brinda mejores propiedades mecánicas a los productos terminados. Esta idea brindó una solución más eficiente y además reduce el consumo de materia prima virgen lo que provocó una disminución de costos y se generó un impacto positivo al medio ambiente. [8].

1.4.3.2. Reciclaje de tubería de PVC para fluido térmico.

La presente investigación se centró en la invención de una tubería con buen aislamiento térmico usando residuos plástico de PVC; en muchas ocasiones, estos desechos de PVC son quemados y enterrados provocando daños en la instalaciones de tratamientos debido a las dioxinas y gases tóxicos que causan contaminación al medio ambiente ya que se libera cloruro orgánico, por ello, se optó por diseñar una tubería que consta de una capa interna de 110 mm, una capa externa de 130 mm y una capa intermedia de espuma de 120 mm de diámetro (ver figura 1.3) [9].

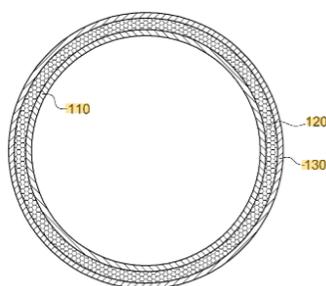


Figura 1.3. Tubería para fluido térmico [9]

La elaboración de esta tubería a partir de SCRAP (material reciclado) de PVC tuvo la siguiente composición (ver tabla 1.3). Esta fórmula detalla mediante rangos el contenido de producto tanto para la capa interna/externa como la capa media de la tubería, es decir, para la

capa media por cada 100 partes en peso de PVC virgen se coloca de 2 a 30 partes en peso de espumante azodicarbonamida.

Tabla 1.3. Fórmula de tubería de refrigeración y calefacción [9]

Capa interior 110mm y Capa exterior 130mm	
100	partes en peso de resina PVC
5 – 9	partes en peso de butilo-acrílico
2 – 10	partes en peso de acrilato de alquilo
Capa media de 120mm	
100	partes de resina PVC reciclada
2 – 30	partes de azodicarbonamida
2 – 30	partes de peróxido de dicumilo
2 – 30	partes de estearato de zinc

Esta invención se la realizó usando coextrusoras a temperaturas de 150-180°C, mientras que el PVC reciclado debe ajustarse a una temperatura de 180°C para mantener buena resistencia en el espumado [9].

Capítulo 2

Metodología

Para la elaboración de una tubería para ventilación a partir de residuos pulverizados de PVC se siguió la siguiente metodología para establecer los requisitos, condiciones y factores que debe cumplir la materia prima para fabricar la tubería.

Para realizar el análisis experimental de la materia prima se hicieron 3 formulaciones del compuesto a analizar. Más adelante, se procesará mediante extrusión para obtener una tubería de PVC con el objetivo de evaluarla con especificaciones técnicas internas del fabricante basadas en la normativa NTE INEN 2474 (ver Figura 2.1).

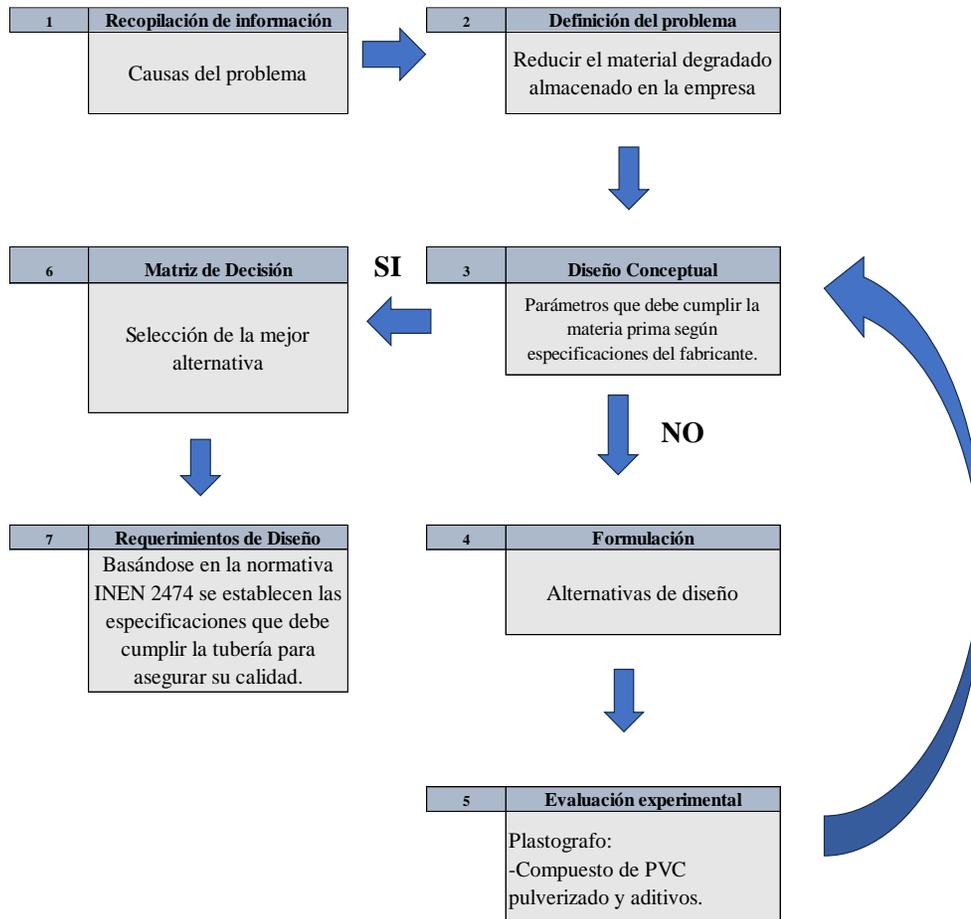


Figura 2.1. Diagrama de metodología de diseño

2.1. Diseño Conceptual

En este apartado, se establecieron los requerimientos y restricciones, factores y se señala la selección de la mejor alternativa para la elaboración de la tubería de ventilación.

2.1.1. *Requerimientos para la materia prima.*

Los parámetros que influyeron en la elaboración de la tubería de ventilación son los que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de influencia

Parámetros	Requisito
Densidad Aparente	0.6 - 0.7 g/cm ³
Tiempo de Fusión	1:30 – 3:30 minutos
Torque de Fusión	10 – 20 Nm
Temperatura de Fusión	185 – 195°C
Tiempo de Degradación	Tiempo > 6 minutos
Temperatura de Degradación	Temperatura < 215°C

Estos parámetros son tomados como criterios para la selección de la mejor alternativa, para ello, antes se debe establecer un orden de importancia. La densidad aparente es el criterio con mayor importancia debe estar entre 0.6 - 0.7 g/cm³, dentro de este criterio se escoge la densidad más baja entre las alternativas, ya que así se reduce la fricción entre las partículas del compuesto. El tiempo de degradación es el segundo criterio de importancia ya que debe estar en un tiempo mayor a 6 minutos; entre los resultados reológicos se escoge el tiempo más alto, ya

que así el material no se deteriorará al estar mucho tiempo dentro de la extrusora. El tiempo de fusión debe ser alto, porque así, el material podrá alcanzar temperatura ideal donde obtiene las propiedades deseadas y además no se quemará durante su procesamiento. Torque de fusión debe ser el promedio entre el rango mostrado en la tabla 2.1 ya que así el tornillo de la extrusora no realiza mucho trabajo lo que podría reducir su tiempo de vida útil y se mantiene un equilibrio entre trabajo y eficiencia. La temperatura de fusión debe ser la menor entre los resultados ya que así no necesitará mucha energía para plastificarse y la temperatura de degradación debe ser alta ya que así el material no se quemará durante su procesamiento.

Densidad Aparente > Tiempo de Degradación > Tiempo de Fusión > Torque de Fusión = Temperatura de Fusión = Temperatura de Degradación

Tabla 2.2. Ponderación de los criterios para selección de fórmula de tubería

CRITERIOS	Densidad Aparente	Tiempo de Fusión	Torque de Fusión	Temperatura de Fusión	Tiempo de Degradación	Temperatura de Degradación	$\Sigma+1$	Ponderación
Densidad Aparente	X	1	1	1	1	1	5	0.29
Tiempo de Fusión	0	X	1	1	1	1	4	0.24
Torque de Fusión	0	0	X	0.5	0.5	1	2	0.12
Temperatura de Fusión	0	0	0.5	X	0	0.5	1	0.06
Tiempo de Degradación	0	1	1	1	X	1	4	0.24
Temperatura de Degradación	0	0	0.5	0.5	0	X	1	0.06
Suma							17	1

De los datos de la Tabla 2.2, se estableció el orden de los criterios, por lo cual, el más importante es la densidad aparente con una ponderación de 0.29; seguido a este criterio se encuentra el tiempo de fusión y tiempo de degradación a una ponderación de 0.24, a este criterio le sigue el torque de fusión a una ponderación de 0.12. Luego, se tiene como iguales a los criterios tiempo de fusión y temperatura de degradación con una ponderación de 0.06. La mejor fórmula será aquella que tenga mayor valoración en la selección de la alternativa.

2.1.2. Procedimiento experimental

Para la preparación del compuesto, primero se trituro estabilizante a base de Ca en un mortero cerámico; cabe recalcar que cada kg aditivo es por cada 100 kg de PVC virgen. Una vez obtenido el peso del estabilizante por medio de una balanza de precisión electrónica, se colocó en un vaso de precipitación en espera de los otros productos, a continuación, se pesó la cera parafínica y se añadió al estabilizante, este procedimiento se lo realizó para cada aditivo.

Una vez mezclado todos los aditivos, se procedió a realizar una prueba de densidad que consiste en tomar una cierta cantidad de material en un vaso de 100 cm³ y pesarla en una balanza para obtener su densidad aparente. Luego, se evaluó mediante reología en un plastógrafo a condiciones normales de plastificación, es decir, temperatura de 185°C, torque de 45 RPM y tiempo de 5 min, con esto se obtuvo un gráfico de tiempo, torque y temperatura. En los datos reológicos se toma el valor de torque más bajo, ya que en ese punto el material se plastificó, este dato sirve para conocer el comportamiento plástico dentro de una extrusora. Una vez obtenidos los datos, se evalúa nuevamente usando plastógrafo, pero con diferentes condiciones, para ello se realizó un ensayo de degradación a una temperatura de 190°C, torque de 60 RPM y tiempo de 15

minutos. A estas condiciones se busca el torque más elevado ya que en este punto el material se degrada con ello se obtienen los datos necesarios para comparar con cada compuesto de cada fórmula (ver figura 2.2).



Figura 2.2. Preparación del compuesto

2.1.3. Alternativas de diseño

A continuación, se muestran las alternativas para la elaboración de una tubería de ventilación, las alternativas son fórmulas que permitirán preparar un compuesto capaz de cumplir los parámetros de influencia; cada fórmula mantiene el mismo contenido de PVC reciclado pulverizado y PVC virgen, pero la cantidad de ciertos aditivos es distinta, como se explica a continuación, cabe recalcar que el contenido de aditivo es por cada 100 kg de PVC virgen.

2.1.3.1. Alternativa 1: Fórmula gris ventilación 1

Esta fórmula, además del PVC virgen y PVC reciclado, se caracteriza por usar lubricantes, cera, pigmentos y material de relleno, cada aditivo se encarga de darle estabilidad al PVC durante su procesamiento, por lo que el contenido de cada uno es muy importante. A continuación, en la tabla 2.3 se muestra el contenido de cada aditivo.

Tabla 2.3. Fórmula 1 para tubería gris ventilación

Producto	Composición [kg]
Estabilizador térmico basado en Ca	2.5 – 3.0
Parafina sintética	0.25 – 0.35
Pigmento 1	0.40 – 0.50
Pigmento 2	0.02 – 0.03
Carbonato de Calcio CaCO_3	25.0 – 30.0
PVC virgen	100
PVC reciclado	30

Esta fórmula usó un contenido de PVC cercano al 30%, que es lo más ideal ya que a partir de este porcentaje es posible reprocesarlo mezclándolo con el material virgen [10]. Esta formulación, evaluándola en plastógrafo, obtuvo los siguientes resultados.

Densidad aparente 0.62 g/cm³

Plastificación

- Tiempo: 1:56 min
- Torque: 18.8 Nm

- Temperatura: 190°C

Degradación

- Tiempo: 6:12 min
- Torque: 13.7 Nm
- Temperatura: 205°C

2.1.3.2. Alternativa 2: Fórmula gris ventilación 2

En esta fórmula se propuso aumentar el contenido de parafina sintética, ya que al evaluar la fórmula anterior se observó que era necesario aumentar el tiempo de plastificación y degradación, así que por medio de la parafina se estima una mejoría o aumento en los tiempos de plastificación y degradación, esto se da por la reducción en la fricción entre el polímero fundido y las superficies calientes, lo que evitará que el material se caliente en exceso [7]. A continuación, se muestra en la tabla 2.4 el cambio presentado.

Tabla 2.4. Fórmula 2 para tubería gris ventilación

Producto	Rango [kg]
Estabilizador térmico basado en Ca	2.5 – 3.0
Parafina sintética	0.45 – 0.55
Pigmento 1	0.40 – 0.50
Pigmento 2	0.02 – 0.03
Carbonato de Calcio CaCO ₃	25.0 – 30.0
PVC virgen	100
PVC reciclado	30

Con este cambio, el compuesto incrementó su tiempo de plastificación y degradación.

Esta formulación obtuvo los siguientes resultados.

Densidad aparente 0.62 g/cm³

Plastificación

- Tiempo: 2:36 min
- Torque: 17 Nm
- Temperatura: 192°C

Degradación

- Tiempo: 6:56
- Torque: 12 Nm
- Temperatura: 203°C

2.1.3.3. Alternativa 3: Fórmula gris ventilación 3

Con las fórmulas anteriores, se alcanzaron los parámetros requeridos, pero, en una industria lo que se busca es optimizar el proceso de producción, por ello, se diseñó una nueva fórmula con un aumento de 0.5 g de estabilizador térmico basado en Ca, con este cambio se espera elevar el tiempo de degradación con el objetivo de que esta fórmula pueda ser usada en la mayoría de líneas de producción dentro de la empresa, así se evita la producción de un solo producto por máquina, también esta fórmula toma en cuenta ciertos imprevistos como cortes de energía o fallas en las resistencias conectadas en los barriles de las extrusoras ya que pueden quemar el material que se encuentra plastificando dentro de la extrusora, para tratar de mantener estable durante estos imprevistos (Ver tabla 2.5).

Tabla 2.5. Fórmula 3 para tubería gris ventilación

Producto	Rango [kg]
Estabilizador térmico basado en Ca	3.0 – 3.5
Parafina sintética	0.45 – 0.55
Pigmento 1	0.40 – 0.50
Pigmento 2	0.02 – 0.03
Carbonato de Calcio CaCO ₃	25.0 – 30.0
PVC virgen	100
PVC reciclado	30

Incrementando el contenido de estabilizador térmico basado en Ca-Zn aumentó el tiempo de degradación, lo que evita que el compuesto se queme o degrade ocasionando la deshidrocloración y la fragmentación [7]. Esta formulación, evaluándola en plastógrafo, obtuvo los siguientes resultados.

Densidad Aparente: 0.64 g/cm³

Plastificación

- Tiempo: 4:00 min
- Torque: 7.8 Nm
- Temperatura: 192°C

Degradación

- Tiempo: 12:18
- Torque: 6.8 Nm

- Temperatura: 200°C

Estas formulaciones, fueron comparadas con cada criterio de selección con el objetivo de mostrar la alternativa más idónea para la fabricación de la tubería (ver tabla 2.6).

Tabla 2.6. Matriz de decisión

Parámetros	Ponderación	Fórmula 1		Fórmula 2		Fórmula 3	
Densidad Aparente	0.29	0.17	0.0493	0.67	0.1943	0.17	0.0493
Tiempo de Fusión	0.24	0	0	0.33	0.0792	0.67	0.1608
Torque de Fusión	0.12	0	0	0.33	0.0396	0.67	0.0804
Temperatura de Fusión	0.06	0.67	0.0402	0	0	0.33	0.0198
Tiempo de Degradación	0.24	0	0	0.33	0.0792	0.67	0.1608
Temperatura de Degradación	0.06	0.67	0.0402	0.33	0.0198	0	0
TOTAL			0.1297		0.4121		0.4711

La mejor alternativa para la elaboración de una tubería según la matriz de decisión resultó ser la fórmula 3. Cada valor de la matriz se encuentra en el Apéndice A.

2.2. Materiales

2.2.1. PVC degradado

Es un material pulverizado de color no uniforme proveniente de procesos fallidos donde hubo quema de materia prima durante la fabricación de las tuberías de PVC, este material tiene en su composición una serie de aditivos, lo que permite tener una densidad aparente de 0.41 g/cm³, su humedad es de 0.66 %, se caracteriza por que cada tamaño de partícula tiene un diámetro promedio de 5.38 micras lo que permite tener buena fluidez.

2.2.2. Estabilizador térmico

En el procesado del PVC a elevadas temperaturas, se generan hidrógenos libres lo que provoca la decoloración y reducción de las propiedades físicas y químicas. Es ahí donde entran los estabilizantes térmicos retardando la deshidrocloración y la autooxidación mejorando la temperatura de servicio del PVC. En la actualidad, el más usado es el estabilizador térmico basado en Ca [7].

2.2.3. Rellenos

Los rellenos se usan para reducir el costo de la materia prima y a medida que aumenta el relleno, aumenta la densidad del producto final; influye durante el procesamiento en el acabado de la superficie. Un relleno muy común es el carbonato de calcio (CaCO_3), también conocido como tiza, es un mineral de calcita que modifica las propiedades mecánicas del PVC, es decir brinda rigidez al material [7].

2.2.4. Lubricantes

Los lubricantes reducen la fricción entre el polímero fundido y las superficies metálicas calientes durante el procesamiento, además, reduce las fuerzas de fricción dentro de la matriz polimérica provocando una disminución de la viscosidad. Los más usados son la ceras parafínicas [7].

2.2.5. Pigmentos

Los pigmentos son partículas termoestables y tienen buena estabilidad al exponerse a la luz, el más común es el TiO_2 . Su uso principal es en la fabricación de tuberías para blanquear y opacar, además de permitir la protección contra la radiación ultravioleta (UV) [7].

2.3. Requerimientos de diseño de tubería.

Una vez seleccionada la mejor alternativa en base a las especificaciones del fabricante se requiere elaborar una tubería de PVC usando material degradado pulverizado mediante extrusión con propiedades similares a las tuberías de ventilación del mercado; para ello, este producto debe cumplir los estándares de la empresa que son basados en la normativa NTE INEN 2474, la cual menciona los ensayos como presión hidrostática, resistencia al impacto, temperatura de ablandamiento VICAT y resistencia química (ver Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Requerimientos de diseño para la tubería de ventilación[13]

REQUERIMIENTO	OBJETIVO
Presión hidrostática	Resistencia a una presión de 0.5 MPa por un tiempo de 90 s sin fracturarse.
Resistencia al impacto	Se impacta a la tubería con una masa de 2 kg a una altura de 2 m.
Temperatura de ablandamiento VICAT	Las probetas deben deformarse 1 mm a una temperatura superior a los 79°C.
Resistencia química	Las probetas inmersas en acetona no deben presentar desintegración o exfoliación en más de un 10% en la superficie interior y exterior

2.3.1. *Presión hidrostática interna*

Para este ensayo es necesario 3 probetas. La longitud de la probeta con diámetros de 150 mm o menores, no deben ser menos de 300 mm de longitud; además, se debe determinar el espesor mínimo de pared en cada extremo de la probeta y medir el diámetro exterior promedio en los extremos y mitad de la misma. Se debe acoplar los cabezales correspondientes para luego acoplar la probeta al sistema de presión, se llena con agua, se purgas el aire atrapado y se sumerge en la piscina de presión [11].

2.3.2. *Resistencia al impacto*

En este ensayo es necesario 3 probetas. La longitud de la probeta es de 150 mm para tubos con diámetros exteriores menores o iguales a 75mm. Las superficie debe ser lisa y libre de rebabas. En este ensayo se debe trazar una generatriz de acuerdo con el diámetro de la probeta, si es de 75 mm de diámetro exterior, se realizan 4 generatrices equidistantes, es decir, cada probeta recibe 4 impactos equidistantes, para ello se usa una masa de 2 kg a una altura de 2 m [12].

2.3.3. *Temperatura de ablandamiento VICAT*

Para este ensayo se debe tener 2 probetas, la longitud de cada probeta es de 2 cm de ancho por 5 cm de largo, para el cumplimiento de la normativa la probeta no debe deformarse 1 mm antes de los 79°C [13].

2.3.4. Resistencia química

Para realizar este ensayo se debe usar 3 probetas con un tamaño no menor a 13mm de altura y sumergirlas en acetona cuya densidad sea de 0.7857 g/cm^3 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [14], las probetas no deben mostrar blanqueamiento, desprendimiento o deterioro ya que de lo contrario no ha tenido un adecuado proceso de Plastificación [15].

Capítulo 3

Resultados y análisis

Usando la alternativa 3, se logró extruir tuberías para uso en ventilación a una temperatura cercana a los 178°C y a una velocidad aproximada de 19 rpm para el motor principal; sin embargo, esta presenta pequeñas picaduras en su interior y en su superficie exterior. Esto es debido al uso de 30 kg de PVC degradado [16] ya que este presenta bajo grado de gelificación que genera ligeras rupturas reológicas por cizallamiento [17], lo que ocasiona picaduras (ver figura 3.1).



Figura 3.1. Tubería de ventilación a partir de material reciclado de PVC

Se presume que para reducir las picaduras se debería disminuir el contenido de PVC degradado. A continuación, se presentan las pruebas y resultados de la evaluación según las especificaciones técnicas internas de la empresa basadas en la normativa INEN 2474.

3.1. Ensayos mecánicos

Se realizaron 3 ensayos mecánicos: prueba de presión hidrostática interna, resistencia al impacto y temperatura de ablandamiento Vicat.

3.1.1. Prueba de presión hidrostática interior

Este ensayo procura verificar la integridad estructural de la tubería [18], a través de la presión ejercida por el agua dentro de la tubería.

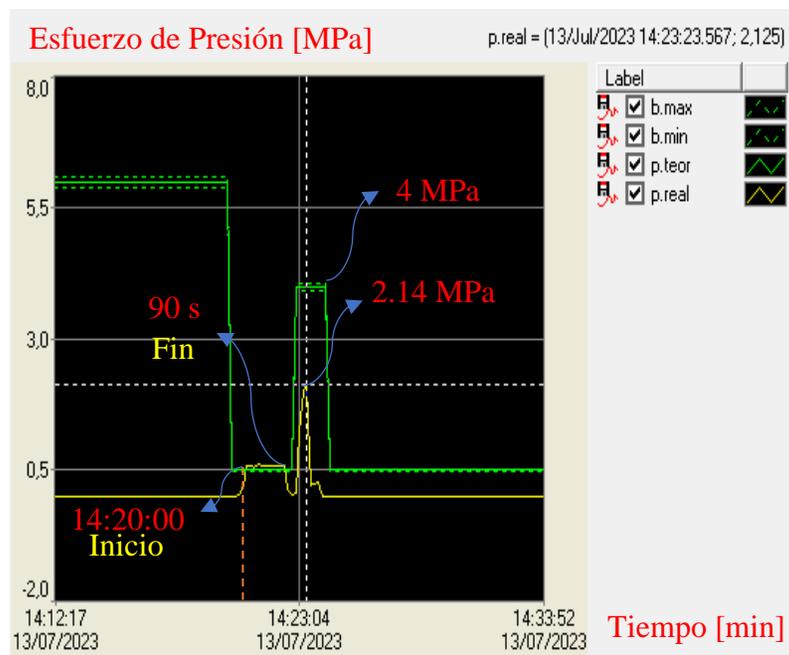


Figura 3.2. Prueba de presión hidrostática interna

De acuerdo con el ensayo, las probetas lograron soportar 90 s a una presión de 0,5 MPa lo que indica que cumplió el requisito de la normativa INEN 2474. Además, se aumentó la presión a 4 MPa para observar su resistencia máxima, la tubería llegó a alcanzar una presión interna promedio de 2,15 MPa (ver figura 3.2); las otras 2 gráficas de las pruebas de presión se

encuentran en el apéndice B. Se presume que este valor se alcanzó gracias a sus 2 mm de espesor, pero no soportó una mayor presión debido a las picaduras en su superficie que son concentradores de esfuerzos. Las tuberías del mercado ecuatoriano para esta misma aplicación tienen un espesor aproximado de 1.8 mm los cuales soportan una presión hidrostática interna aproximada de 2.2 MPa.

3.1.2. Resistencia al impacto

En esta experimentación se pretende comprobar la rigidez de la tubería a través de la caída de una masa en puntos equidistantes alrededor de la tubería (ver figura 3.3).



Figura 3.3. Ensayo de resistencia al impacto



Figura 3.4. Probetas evaluadas mediante resistencia al impacto

Cada probeta evaluada soportó 4 impactos, ninguna probeta mostró fallas o roturas, lo que indica que la tubería cumplió con este requisito de especificación (ver figura 3.4). Las probetas resistieron el ensayo de impacto debido al comportamiento dúctil que se obtiene por la presencia de una gran variedad de modificadores de propiedades que están presentes en los tubos reciclados [19].

3.1.3. Temperatura de ablandamiento Vicat

El objetivo de esta experimentación es observar el ablandamiento de una probeta de tubería la cual debe ablandarse o deformarse máximo 1 mm a más de 79°C. El equipo que permite este ensayo se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5. Equipo de ablandamiento Vicat



Figura 3.6. Probetas en evaluación usando equipo Vicat

Las 2 probetas evaluadas en este ensayo llegaron a deformarse 1 mm a los 80°C, como se observa en la figura 3.6, lo que permite concluir que la tubería superó el requisito estipulado en la normativa. Esto es debido a la ductilidad que obtiene por la presencia de una gran variedad de modificadores de propiedades provenientes de la mezcla de las distintas tuberías [19].

3.2. Ensayo químico (Acetona)

En este apartado, la tubería debe ser evaluada en acetona con el objetivo de observar su resistencia química. Este ensayo tiene el propósito de observar la calidad de la fusión o extrusión de las tuberías de PVC [13], [20].



Figura 3.7. Probetas evaluadas en acetona

Como se puede observar en la figura 3.7, las probetas no mostraron ningún deterioro o desprendimiento de material, por lo cual la tubería aprobó este requerimiento. Este comportamiento se presume que es debido a que la materia prima tuvo una buena polimerización con el material degradado ya que se trata de dos materiales cuya estructura molecular es similar lo que permite una buena relación entre ellos, además, presentaron una decoloración que es causada por el hinchamiento y ablandamiento provocado por la interacción entre la acetona y la cadena polimérica.

3.3. Análisis financiero

Para el análisis financiero de la tubería de ventilación se ha utilizado 1.15 kg de material compuesto para elaborar una tubería (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1. Datos de la tubería de ventilación

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	0.0015394	kg/cm ³
Volumen	744	cm ³
Masa	1.15	kg

Para los cálculos del costo de la materia prima, se consideró el costo del compuesto que tiene un valor de \$ 0.78 por cada kg de material, para la tubería es necesario 1.15 kg por lo que el costo es de \$ 1.04, el costo de fabricación es un valor referencial obtenido por parte de la empresa, siendo este de \$ 1.7. Producir una tubería de ventilación con material degradado tiene un valor de \$ 2.74, a este valor se le agrega un margen de ganancia del 15%, cuyo valor es de \$0.41, lo que da un precio final de \$ 3.15 más IVA (ver tabla 3.2). Este precio es competitivo con las tuberías del mercado ecuatoriano, los precios de otras tuberías similares se encuentran en el apéndice C.

Tabla 3.2. Costos de la producción y precio de venta

Costo de Materia Prima (unidad)	\$ 1.04
PVC (virgen)	\$ 0.70
PVC (degradado)	\$ 0.06
Parafina	\$ 0.02
Pigmento 1	\$ 0.10
Pigmento 2	\$ 0.05
Carbonato de Calcio	\$ 0.04
Estabilizador Térmico	\$ 0.07
Costo de Fabricación (unidad)	\$ 1.70
Mano de obra	\$ 0.62
Maquinaria	\$ 0.60
Insumos	\$ 0.45
Transporte	\$ 0.03
Total Costos (unidad)	\$ 2.74
Margen de contribución (15%)	\$0.41
Precio de venta sugerido (unidad)	\$ 3.15

3.2.1. Viabilidad Económica del Proyecto

Para este análisis, se tomaron en cuenta algunos indicadores financieros en base a la producción de tuberías para uso en ventilación. La empresa pretende con esta idea fabricar 7,920 tuberías para el primer año destinadas a los sectores rurales del país a un precio de \$ 3.15 lo que permite un ingreso de \$ 24,948.00. Los egresos fijos contemplan mano de obra, maquinaria, transporte e insumos (agua, luz), para el primer año se estima que los egresos son alrededor de \$ 22,700.80. Además, en este análisis se consideró el pago del impuesto a la renta del 17% establecido para empresas grandes y medianas, lo que genera un flujo de efectivo \$ 382.02 para el primer año, los años siguientes se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Flujo efectivo a 5 años

FLUJO DE EFECTIVO FINANCIERO						
Periodicidad Anual		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
INGRESOS	\$ 17,000.00	\$ 24,948.00	\$ 49,896.00	\$ 74,844.00	\$ 99,792.00	\$ 124,740.00
EGRESOS	\$ -	\$ 22,700.80	\$ 45,401.60	\$ 68,102.40	\$ 90,803.20	\$ 113,504.00
Mano de obra	\$ -	\$ 4,910.40	\$ 9,820.80	\$ 14,731.20	\$ 19,641.60	\$ 24,552.00
Insumos	\$ -	\$ 3,564.00	\$ 7,128.00	\$ 10,692.00	\$ 14,256.00	\$ 17,820.00
Maquinaria	\$ -	\$ 4,752.00	\$ 9,504.00	\$ 14,256.00	\$ 19,008.00	\$ 23,760.00
Otros gastos	\$ -	\$ 9,236.80	\$ 18,473.60	\$ 27,710.40	\$ 36,947.20	\$ 46,184.00
Transporte	\$ -	\$ 237.60	\$ 475.20	\$ 712.80	\$ 950.40	\$ 1,188.00
UTILIDAD	\$ -	\$ 2,247.20	\$ 4,494.40	\$ 6,741.60	\$ 8,988.80	\$ 11,236.00
Impuesto a la renta 17%	\$ -	\$ 382.02	\$ 764.05	\$ 1,146.07	\$ 1,528.10	\$ 1,910.12
FLUJO DE EFECTIVO NETO	\$ 17,000.00	\$ 1,865.18	\$ 3,730.35	\$ 5,595.53	\$ 7,460.70	\$ 9,325.88

Por otro lado, conviene saber si esta propuesta es rentable por lo que se deben analizar algunos indicadores financieros como lo es el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

3.2.1.1. Valor Actual Neto (VAN)

Para el cálculo de este indicador financiero se consideró una tasa de descuento del 9.29% anual establecida por el banco central del Ecuador para un sector productivo corporativo [21] a un tiempo de 5 años. Según el cálculo del VAN mostrado en la tabla 3.4, señalando que este proyecto de fabricar tuberías de ventilación es rentable, con un valor positivo de \$ 3,326.89.

Tabla 3.4. Cálculo del valor actual neto (VAN)

Valor Actual Neto			VAN
Flujo de Efectivo	Valor	$Ft/(1+k)^t$	\$ 3,326.89
Año 0	\$ -17,000.00	\$ -17,000.00	
Año 1	\$ 1865.18	\$ 1,706.63	
Año 2	\$ 3,730.35	\$ 3,123.12	
Año 3	\$ 5,595.53	\$ 4,286.47	
Año 4	\$ 7,460.70	\$ 5,229.48	
Año 5	\$ 9,325.88	\$ 5,981.19	
Tasa de Descuento		9.29%	

3.2.1.2. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Este indicador financiero demuestra si es recuperable la inversión, como se observa en la tabla 3.5 es posible recuperar la inversión a una tasa del 15.05% que es mayor a la tasa de interés establecida por los banco central del ecuador del 9.29%, por lo que es viable invertir en esta propuesta.

Tabla 3.5. Cálculo de la tasa de interna de retorno (TIR)

Tasa Interna de Retorno			TIR
Flujo de Efectivo	Valor	Ft/(1+TIR)^t	
Año 0	\$ -17,000.00	\$ -17,000.00	15.05%
Año 1	\$ 1865.18	\$ 1,621.23	
Año 2	\$ 3,730.35	\$ 2,818.37	
Año 3	\$ 5,595.53	\$ 3,676.62	
Año 4	\$ 7,460.70	\$ 4,258.68	
Año 5	\$ 9,325.88	\$ 4,627.10	

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

El presente proyecto tuvo la iniciativa de fomentar el uso del PVC degradado dentro de una matriz de PVC virgen para elaborar una tubería para uso en ventilación la cual fue evaluada mediante especificaciones internas de la empresa basadas en la normativa INEN 2474 para asegurar la calidad de la tubería.

4.1. Conclusiones

- Con los residuos pulverizados de PVC se obtuvo, mediante el proceso de extrusión , una tubería de PVC para uso en ventilación de los sistemas de conducción de aguas residuales, aguas lluvias y/o aguas negras con los siguientes parámetros, una temperatura cercana a los 78°C y a una velocidad cercana a los 19 RPM para el motor principal.
- Mediante indicadores financieros, se estableció que la tubería desarrollada en este proyecto es rentable financieramente con un valor actual neto (VAN) de \$ 3,326.86 y una tasa interna de retorno (TIR) del 15%, mayor a la tasa de descuento anual establecida por el banco central del Ecuador para un sector productivo corporativo, con ello se afirma que generará ganancias y es recuperable la inversión a 5 años.
- La superficie de la tubería de ventilación presentó pequeñas picaduras externas e internas, causadas por el 30% de material degradado en el compuesto.
- En la prueba de presión hidrostática interna soportó 90 s a una presión de 0.5 MPa, además, tuvo una resistencia máxima interna promedio de 2.15 MPa.
- En la prueba de resistencia al impacto soportó el impacto de una masa de 2 kg a una altura de 2 m, con lo cual la tubería presente buena integridad estructural.

- En la prueba de ablandamiento Vicat, se ablandó 1 mm a una temperatura de 80°C, con lo cual se afirma que puede ser usada para la ventilación de los gases producidos por las aguas residuales almacenadas.
- En la prueba de resistencia a la acetona no presentó deterioro o desprendimiento de material, solo presentó hinchamiento y ablandamiento que son características normales entre la interacción del PVC y la acetona.
- La tubería aprobó los requisitos establecidos por la empresa basados en la normativa INEN 2474 para los sistemas de conducción de aguas residuales, aguas lluvias y/o aguas negras.

4.2. Recomendaciones

- Reducir hasta un 15 % ó 10 % de PVC degradado en la matriz de PVC virgen para verificar si la tubería aún presenta picaduras en la superficie externa e interna.
- Para asegurar la integridad de la superficie tubería de PVC o el grado de gelificación del material, se recomienda realizar ensayo químico en diclorometano establecido por la normativa INEN 2474, con el objetivo de observar su resistencia química al estar en contacto con este fluido.
- En proyectos futuros se puede utilizar este material degradado para la elaboración de recubrimientos para cables eléctricos, parantes viales o tuberías multicapa, los cuales pueden ser elaborados mediante el proceso de inyección o extrusión, para ello, se debe estudiar la reología del compuesto y realizar pruebas en las líneas de producción para verificar la calidad del producto y su procesabilidad.

Referencias

- [1] D. Braun, "Recycling of PVC." [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/ppolysci
- [2] D. Garcia, R. Balart, J. E. Crespo, and J. Lopez, "Mechanical properties of recycled PVC blends with styrenic polymers," *J Appl Polym Sci*, vol. 101, no. 4, pp. 2464–2471, Aug. 2006, doi: 10.1002/app.23484.
- [3] K. A. Brown, M. R. Holland, R. A. Boyd, S. Thresh, H. Jones, and S. M. Ogilvie, "Economic Evaluation of PVC Waste Management A report produced for European Commission Environment Directorate," 2000.
- [4] N. Yarahmadi, I. Jakubowicz, and T. Gevert, "Effects of repeated extrusion on the properties and durability of rigid PVC scrap," *Polym Degrad Stab*, vol. 73, no. 1, pp. 93–99, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0141-3910(01)00073-8.
- [5] K. Lewandowski and K. Skórczewska, "A Brief Review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Recycling," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/POLYM14153035.
- [6] "What is Mechanical Recycling? - TWI." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-mechanical-recycling#WhataretheStepsofMechanicalRecycling> (accessed Jun. 04, 2023).
- [7] S. Patrick, "PVC Compounds and Processing," vol. 15, no. 3, 2004.
- [8] "Micronized recycled pvc multilayer pipes and process to obtain them," Aug. 2018.
- [9] L. Gyehyeongsan, L. Yongmu, and Jong-tae, "Recycling PVC pipe for thermal fluid," Nov. 2015.

- [10] K. Lewandowski and K. Skórczewska, “A Brief Review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Recycling,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/POLYM14153035.
- [11] Ecuador, *INEN 503 TUBERÍA PLÁSTICA. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA INTERIOR SOSTENIDA Primera edición PLASTIC PIPE. DETERMINATION OF THE HYDSROSTATIC RESISTANCE TO INTERNAL PRESSURE UNDER CONSTANT INTERVAL*. 1986.
- [12] Ecuador, *NTE INEN 504 Tubería plástica. Determinación de la resistencia al impacto*. Ecuador, 1986.
- [13] Q. -Ecuador, “TUBERÍA PLÁSTICA. TUBOS DE PVC RÍGIDO PARA USO EN VENTILACIÓN DE SISTEMAS SANITARIOS. REQUISITOS,” 2009.
- [14] Ecuador, *NTE INEN 507:2013 PLASTIC PIPING. ADECUACY OF FUSION OF EXTRUDED POLY(VINIL CLHORIDE) (PVC) PIPE AND MOLDED FITINGS BY ACETONE IMMERSION*. Quito, 2013.
- [15] ISO, *Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) pipes-Dichloromethane resistance at specified temperature (DCMT)-Test method*. 2007.
- [16] E. B. Rabinovitch and P. C. Booth, “Use of regrind in the PVC extrusion process,” *Journal of Vinyl Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 43–47, Mar. 1990, doi: 10.1002/VNL.730120110.
- [17] N. Yarahmadi, I. Jakubowicz, and T. Gevert, “Effects of repeated extrusion on the properties and durability of rigid PVC scrap,” *Polym Degrad Stab*, vol. 73, no. 1, pp. 93–99, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0141-3910(01)00073-8.

- [18] S. Papavinasam, “Monitoring – External Corrosion,” *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry*, pp. 715–750, Jan. 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-397022-0.00011-X.
- [19] M. A. Wencuanc’ and F. P. La Mantiazt, “Processing and Mechanical Properties of Recycled PVC and of Homopolymer Blends with Virgin PVC.”
- [20] NORMA TÉCNICA ECUATORIANA, *NTE INEN 507:2013 DETERMINACIÓN DE LA FUSIÓN ADECUADA EN TUBERÍA EXTRUIDA Y ACCESORIOS MOLDEADOS DE POLI (CLORURO DE VINILO) (PVC) POR INMERSIÓN EN ACETONA*. Quito-Ecuador, 2013.
- [21] Banco Central del Ecuador, “TASAS DE INTERÉS ACTIVAS EFECTIVAS REFERENCIALES,” Aug. 2023.
<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm> (accessed Aug. 10, 2023).

Apéndices

A. Matriz de decisión

Tabla A. Justificación de los valores de la matriz de decisión para la selección de la alternativa

Densidad Aparente	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Fórmula 1	X	0	0.5	0.5	0.17
Fórmula 2	1	X	1	2	0.67
Fórmula 3	0.5	0	X	0.5	0.17
Suma				3	1

Tiempo de Fusión	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Fórmula 1	X	0	0	0	0
Fórmula 2	1	X	0	1	0.33
Fórmula 3	1	1	X	2	0.67
Suma				3	1

Torque de Fusión	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Fórmula 1	X	0	0	0	0
Fórmula 2	1	X	0	1	0.33
Fórmula 3	1	1	X	2	0.67
Suma				3	1

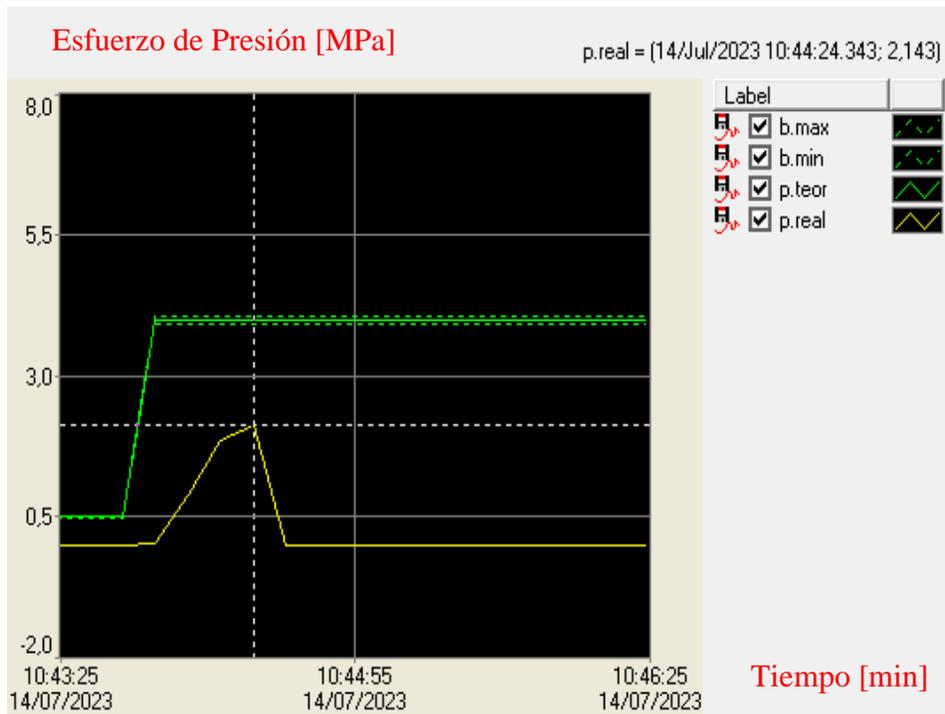
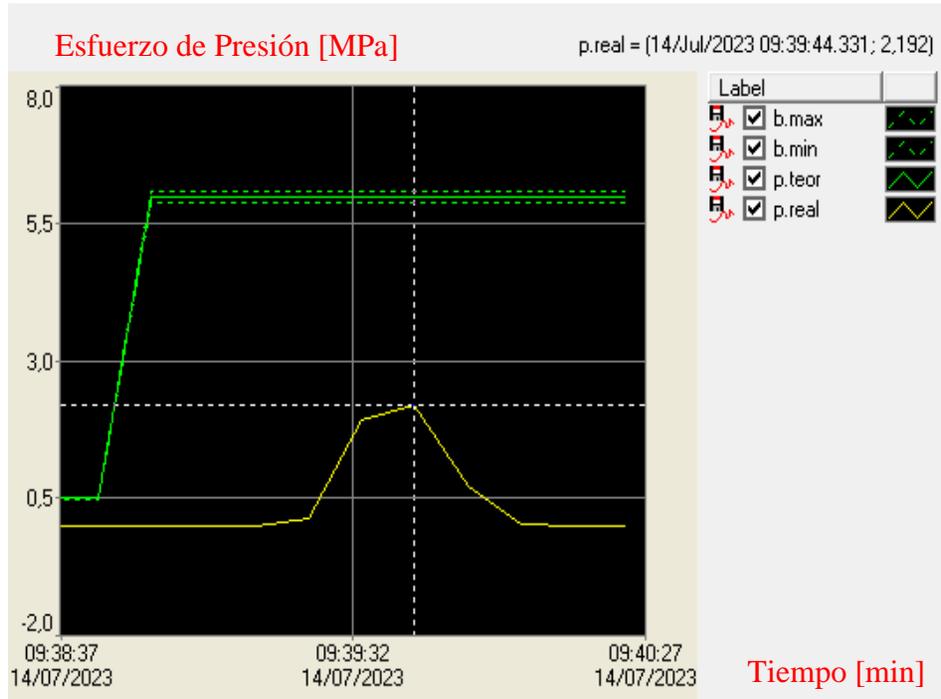
Temperatura de Fusión	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Fórmula 1	X	1	1	2	0.67
Fórmula 2	0	X	0	0	0
Fórmula 3	0	1	X	1	0.33
Suma				3	1

Tiempo de Degradación	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Fórmula 1	X	0	0	0	0
Fórmula 2	1	X	0	1	0.33
Fórmula 3	1	1	X	2	0.67
Suma				3	1

Temperatura de Degradación	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Fórmula 1	X	1	1	2	0.67
Fórmula 2	0	X	1	1	0.33
Fórmula 3	0	0	X	0	0
Suma				3	1

B. Ensayos de Presión Hidrostática Interna

Figura B. Gráficas de pruebas de presión hidrostática a tubería de ventilación de 75 mm de diámetro



C. Precios de tuberías para uso en ventilación del mercado ecuatoriano

Figura C. Cotizaciones de tuberías de ventilación del mercado ecuatoriano



MATRIZ - Cda. Alborada XII Etapa Solar 21-22 Mz.3
 Telefono: 2271888

PROFORMA N°.189851

Cliente: CONSUMIDOR FINAL **Ciudad:** GUAYAQUIL
Vendedor: 1-Carlos Salazar **Teléf:** 2999999999 **Fecha:** 25/07/2023
Observación:

Código	Nombre del Artículo	Cant	Und Med.	P.V.P.	Dcto.	Total
2000000010183	TUBO RIVAL o TIGRE VENT 75MM	3,00	UND	3,8000	0,18%	12,75
2000000007488	TUBO PLASTIG VENT 75	3,00	UND	8,2400	0,00%	27,69
		Base 0%	Base 12%	12% IVA	Total Cotización	
		0,00	36,10	4,33	40,43	